

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E  
ENGENHARIAS**

**GABRIEL PADILHA FRANÇA**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA LUMINÁRIA COM ALTERAÇÃO DE  
ESPECTRO PARA O CULTIVO DE PLANTAS MEDICINAIS**

**CAXIAS DO SUL**

**2026**

**GABRIEL PADILHA FRANÇA**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA LUMINÁRIA COM ALTERAÇÃO DE  
ESPECTRO PARA O CULTIVO DE PLANTAS MEDICINAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial  
à obtenção do título de Engenharia  
Elétrica na Área do Conhecimento  
de Ciências Exatas e Engenharias da  
Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Me. Patricia Gia-  
comelli

**CAXIAS DO SUL**

**2026**

**GABRIEL PADILHA FRANÇA**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA LUMINÁRIA COM ALTERAÇÃO DE  
ESPECTRO PARA O CULTIVO DE PLANTAS MEDICINAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial  
à obtenção do título de Engenharia  
Elétrica na Área do Conhecimento  
de Ciências Exatas e Engenharias da  
Universidade de Caxias do Sul.

**Aprovado(a) em 02/07/2026**

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Me. Patricia Giacomelli  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

---

Prof. Dr. Alexandre Mesquita  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

---

Prof. Me. André Bernardes Michel  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

*Aos ciclos da natureza, que inspiram a busca pelo conhecimento e pela inovação. Que as plantas, com sua simplicidade e complexidade, sigam sendo fonte de aprendizado. A este projeto, dedicado a todos que acreditam no poder transformador da tecnologia para um futuro sustentável e verde.*

*“Nunca encontrará na escuridão o caminho da Luz.”*

***Rodrigo Piccolo***

## RESUMO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma luminária com controle espectral destinada ao cultivo de plantas medicinais em ambiente controlado, com ênfase especial na *Cannabis sativa L.*, espécie que demanda precisão luminosa para maximizar seu potencial terapêutico. A pesquisa abordou os fundamentos da interação entre luz e fisiologia vegetal, destacando os principais fotorreceptores e a influência dos diferentes comprimentos de onda nos processos fotomorfogenéticos, fotossintéticos e de floração. Em seguida, foi discutido o funcionamento dos LEDs, seus materiais semicondutores, os fatores que influenciam sua vida útil e a importância da composição espectral para aplicações em horticultura de precisão. O projeto proposto utilizou LEDs de diferentes faixas espectrais, com um módulo controlado por meio de *strings* dedicadas às fases vegetativa e de floração. O sistema foi gerenciado por um microcontrolador ESP32, permitindo o ajuste dos estágios de desenvolvimento das plantas a partir da modulação espectral e do controle do fotoperíodo. A luminária foi desenvolvida considerando critérios de eficiência energética, estabilidade, distribuição espectral e atendimento às necessidades fisiológicas de espécies medicinais. Devido à legislação, como etapa experimental, os testes foram conduzidos utilizando crisântemo (*Chrysanthemum morifolium*) como espécie modelo, por se tratar de uma planta de dia curto e com ciclo rápido até a floração. Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade técnica do protótipo desenvolvido, evidenciando sua capacidade de operar diferentes regimes de iluminação e aplicar controle espectral de forma automatizada. Dessa forma, o trabalho contribui para o desenvolvimento de soluções de iluminação artificial voltadas à horticultura de precisão, servindo como base para futuros estudos envolvendo respostas fotoperiódicas e cultivo medicinal em ambientes *indoor*.

**Palavras-chave:** Luminária; Horticultura; Composição espectral.

## ABSTRACT

This work presented the development of a spectrally controlled luminaire intended for the cultivation of medicinal plants in a controlled environment, with special emphasis on *Cannabis sativa* L., a species that requires lighting precision to maximize its therapeutic potential. The research addressed the fundamentals of the interaction between light and plant physiology, highlighting the main photoreceptors and the influence of different wavelengths on photo-morphogenic, photosynthetic, and flowering processes. Subsequently, the operating principles of LEDs, their semiconductor materials, the factors that influence their lifetime, and the importance of spectral composition for precision horticulture applications were discussed. The proposed project used LEDs from different spectral ranges, with a module controlled through *strings* dedicated to the vegetative and flowering stages. The system was managed by an ESP32 microcontroller, allowing the adjustment of plant development stages through spectral modulation and photoperiod control. The luminaire was developed considering criteria such as energy efficiency, stability, spectral distribution, and compliance with the physiological needs of medicinal species. Due to legal restrictions, as an experimental stage, the tests were conducted using chrysanthemum (*Chrysanthemum morifolium*) as a model species, since it is a short-day plant with a fast cycle until flowering. The results obtained demonstrated the technical feasibility of the developed prototype, highlighting its ability to operate under different lighting regimes and apply spectral control in an automated manner. Therefore, this work contributes to the development of artificial lighting solutions aimed at precision horticulture, serving as a basis for future studies involving photoperiodic responses and medicinal cultivation in *indoor* environments.

**Keywords:** Luminaire; Horticulture; Spectral composition

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Representação da luz como onda e como energia . . . . .                                                                             | 19 |
| Figura 2 – Principais parâmetros ambientais . . . . .                                                                                          | 20 |
| Figura 3 – Especificidade de comprimento de onda dos principais fotorreceptores das plantas e respostas de fotomorfogênese associadas. . . . . | 22 |
| Figura 4 – Representação do espectro do LED branco . . . . .                                                                                   | 28 |
| Figura 5 – Comparação entre a luz <i>blurple</i> e a luz branca em uma planta medicinal . . .                                                  | 28 |
| Figura 6 – Técnica de cultivo utilizando FR em espécies floríferas . . . . .                                                                   | 29 |
| Figura 7 – Comparação entre a luz sensível ao olho humano e a região PAR. . . . .                                                              | 31 |
| Figura 8 – Representação gráfica do SPD no LED branco. . . . .                                                                                 | 32 |
| Figura 9 – Princípio de funcionamento dos LEDs. . . . .                                                                                        | 35 |
| Figura 10 – Principais semicondutores utilizados em LEDs. . . . .                                                                              | 36 |
| Figura 11 – Eficácia X Densidade de corrente. . . . .                                                                                          | 37 |
| Figura 12 – Corrente x vida útil - LED modelo Luxeon K2. . . . .                                                                               | 37 |
| Figura 13 – Eficácia x Temperatura de junção . . . . .                                                                                         | 38 |
| Figura 14 – Temperatura de junção x Expectativa de vida . . . . .                                                                              | 39 |
| Figura 15 – Modelo elétrico do LED . . . . .                                                                                                   | 40 |
| Figura 16 – Modelos comerciais de luminárias <i>grow</i> de 120 W . . . . .                                                                    | 42 |
| Figura 17 – Comparação entre os modelos de LEDs OSRAM e Samsung aplicados na horticultura . . . . .                                            | 43 |
| Figura 18 – Especificações técnicas da fonte de alimentação . . . . .                                                                          | 44 |
| Figura 19 – Fases da <i>Cannabis Sativa L.</i> . . . . .                                                                                       | 45 |
| Figura 20 – Fases do crisântemo . . . . .                                                                                                      | 45 |
| Figura 21 – Esquemático desenvolvido no software KiCad . . . . .                                                                               | 47 |
| Figura 22 – <i>Footprint</i> desenvolvido no <i>software KiCad</i> . . . . .                                                                   | 48 |
| Figura 23 – Placa de circuito impresso com todas as camadas . . . . .                                                                          | 49 |
| Figura 24 – Placa com camada de cobre oculto . . . . .                                                                                         | 50 |
| Figura 25 – Placa antes da montagem e posteriormente a montagem finalizada . . . . .                                                           | 51 |
| Figura 26 – ESP-WROOM-32 . . . . .                                                                                                             | 52 |
| Figura 27 – Fluxograma do sistema de controle <sup>1</sup> . . . . .                                                                           | 53 |
| Figura 28 – Circuito simplificado de controle . . . . .                                                                                        | 55 |
| Figura 29 – Fonte auxiliar de 5 V . . . . .                                                                                                    | 56 |
| Figura 30 – Controle pelo website . . . . .                                                                                                    | 56 |
| Figura 31 – Ensaio na esfera integradora . . . . .                                                                                             | 59 |
| Figura 32 – PhotonDesk . . . . .                                                                                                               | 60 |
| Figura 33 – Espectro módulo Principal . . . . .                                                                                                | 60 |
| Figura 34 – Espectro Far red . . . . .                                                                                                         | 61 |

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 35 – Resultado Photon Desk . . . . .                         | 62 |
| Figura 36 – Medições térmicas . . . . .                             | 63 |
| Figura 37 – Protótipo e Lâmpadas comercial . . . . .                | 65 |
| Figura 38 – Sistema módulo vermelho distante . . . . .              | 66 |
| Figura 39 – Caules na fase vegetativa . . . . .                     | 67 |
| Figura 40 – Botões florais . . . . .                                | 68 |
| Figura 41 – Altura das plantas . . . . .                            | 68 |
| Figura 42 – Largura das plantas . . . . .                           | 69 |
| Figura 43 – Planta sob iluminação do protótipo . . . . .            | 70 |
| Figura 44 – Planta sob iluminação das lâmpadas comerciais . . . . . | 70 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Classificação de plantas por duração do dia e fotoperíodo para floração. . . . | 21 |
| Tabela 2 – Diferença entre as faixas de radiações ultravioleta . . . . .                  | 25 |
| Tabela 3 – LEDs escolhidos para o projeto . . . . .                                       | 43 |
| Tabela 4 – Características elétricas e ópticas dos LEDs utilizados . . . . .              | 46 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|               |                                              |
|---------------|----------------------------------------------|
| <b>LEDs</b>   | Diodos emissores de luz                      |
| <b>THC</b>    | $\Delta$ 9-Tetrahidrocanabinol               |
| <b>CBD</b>    | Canabidiol                                   |
| <b>CBN</b>    | Canabinol                                    |
| <b>THCA</b>   | Ácido tetra-hidrocanabinólico                |
| <b>ELA</b>    | Esclerose lateral amitrófica                 |
| <b>CBG</b>    | Cannabigerol                                 |
| <b>ANVISA</b> | Agência Nacional de Vigilância Sanitária     |
| <b>QED</b>    | Eletrodinâmica quântica                      |
| $CO_2$        | Dióxido de Carbono                           |
| <b>SDPs</b>   | <i>Short day plants</i>                      |
| <b>LDPs</b>   | <i>Long day plants</i>                       |
| <b>DNPs</b>   | <i>Day neutral plants</i>                    |
| <b>UV</b>     | Ultravioleta                                 |
| <b>PHYs</b>   | Fitocromos                                   |
| <b>R</b>      | Vermelho                                     |
| <b>FR</b>     | Vermelho distante                            |
| <b>PIFs</b>   | Fatores de interação                         |
| <b>CRYs</b>   | Criptocromos                                 |
| <b>PHOTs</b>  | Fototropinas                                 |
| <b>LOV</b>    | <i>Light oxygen voltage</i>                  |
| <b>ZTL</b>    | ZEITLUPE                                     |
| <b>FKF1</b>   | FLAVIN BINDING,KELCHREPEAT,F-BOX             |
| <b>LKP2</b>   | LOVKELCHPROTEIN2                             |
| <b>GI</b>     | GIGANTEA                                     |
| <b>UVR8</b>   | UV RESISTANCE LOCUS 8                        |
| <b>DNA</b>    | Ácido desoxirribonucleico                    |
| <b>PAR</b>    | Radiação Fotossinteticamente Ativa           |
| <b>SPD</b>    | Distribuição Espectral da Potência           |
| <b>PPF</b>    | Fluxo de fótons fotosintéticos               |
| <b>PPFD</b>   | densidade de fluxo de fótons fotossintéticos |
| <b>YPF</b>    | Fluxo de Fótons Ponderados por Rendimento    |

|            |                              |
|------------|------------------------------|
| <b>RQE</b> | Eficiência quântica relativa |
| <b>DLI</b> | Índice diário de luz         |

# SUMÁRIO

|              |                                                                                    |           |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>                                                        | <b>14</b> |
| 1.1          | OBJETIVOS . . . . .                                                                | 16        |
| 1.2          | Delimitações do trabalho . . . . .                                                 | 16        |
| <b>2</b>     | <b>REFERENCIAL TEÓRICO . . . . .</b>                                               | <b>18</b> |
| 2.1          | A Luz e seu papel no desenvolvimento das plantas . . . . .                         | 18        |
| <b>2.1.1</b> | <b>Fotosíntese . . . . .</b>                                                       | <b>19</b> |
| <b>2.1.2</b> | <b>Fotoperíodo . . . . .</b>                                                       | <b>20</b> |
| <b>2.1.3</b> | <b>Composição espectral e fotoreceptores . . . . .</b>                             | <b>21</b> |
| 2.1.3.1      | Fitocromos . . . . .                                                               | 22        |
| 2.1.3.2      | Criptocromos . . . . .                                                             | 23        |
| 2.1.3.3      | Fototropinas . . . . .                                                             | 23        |
| 2.1.3.4      | Família Zeitlupe . . . . .                                                         | 24        |
| 2.1.3.5      | UV RESISTANCE LOCUS 8 . . . . .                                                    | 24        |
| <b>2.1.4</b> | <b>Composição espectral no crescimento e desenvolvimento das plantas . . . . .</b> | <b>25</b> |
| 2.1.4.1      | Fótons ultravioleta . . . . .                                                      | 25        |
| 2.1.4.2      | Fótons Azuis . . . . .                                                             | 26        |
| 2.1.4.3      | Fótons verdes . . . . .                                                            | 26        |
| 2.1.4.4      | Fótons vermelhos . . . . .                                                         | 26        |
| 2.1.4.5      | Fótons brancos . . . . .                                                           | 27        |
| 2.1.4.6      | Fótons vermelhos distantes . . . . .                                               | 27        |
| <b>2.1.5</b> | <b>Cannabis e Crisântemo . . . . .</b>                                             | <b>29</b> |
| 2.2          | Conceitos e grandezas relacionadas . . . . .                                       | 30        |
| <b>2.2.1</b> | <b>Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) . . . . .</b>                          | <b>31</b> |
| <b>2.2.2</b> | <b>Distribuição Espectral da Potência (SPD) . . . . .</b>                          | <b>32</b> |
| <b>2.2.3</b> | <b>Fluxo de fótons fotosintéticos (PPF) . . . . .</b>                              | <b>32</b> |
| <b>2.2.4</b> | <b>Densidade do fluxo de fótons fotosintéticos (PPFD) . . . . .</b>                | <b>33</b> |
| <b>2.2.5</b> | <b>Fluxo de fótons ponderados por rendimento (YPF) . . . . .</b>                   | <b>33</b> |
| <b>2.2.6</b> | <b>Índice diário de luz (DLI) . . . . .</b>                                        | <b>34</b> |
| 2.3          | Diodos emissores de luz (LEDs) . . . . .                                           | 34        |
| <b>2.3.1</b> | <b>Princípio de funcionamento . . . . .</b>                                        | <b>34</b> |
| <b>2.3.2</b> | <b>Fatores importantes para a expectativa de vida do LED . . . . .</b>             | <b>35</b> |
| 2.3.2.1      | Corrente . . . . .                                                                 | 36        |
| 2.3.2.2      | Temperatura . . . . .                                                              | 38        |
| <b>2.3.3</b> | <b>Modelo elétrico linear dos LEDs . . . . .</b>                                   | <b>39</b> |

|              |                                                                |           |
|--------------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3</b>     | <b>MATERIAIS E MÉTODOS . . . . .</b>                           | <b>41</b> |
| 3.1          | Materiais . . . . .                                            | 41        |
| <b>3.1.1</b> | <b>LEDs . . . . .</b>                                          | <b>41</b> |
| 3.1.1.1      | Potência . . . . .                                             | 41        |
| 3.1.1.2      | Escolha dos LEDs . . . . .                                     | 42        |
| <b>3.1.2</b> | <b>Fonte de alimentação . . . . .</b>                          | <b>42</b> |
| 3.2          | Desenvolvimento do sistema . . . . .                           | 43        |
| <b>3.2.1</b> | <b>Módulo de LEDs . . . . .</b>                                | <b>44</b> |
| 3.2.1.1      | Vega e Flora . . . . .                                         | 44        |
| 3.2.1.2      | Arranjo dos LEDs . . . . .                                     | 46        |
| 3.2.1.3      | Desenvolvimento da placa de circuito impresso . . . . .        | 46        |
| 3.2.1.4      | Montagem da placa . . . . .                                    | 49        |
| <b>3.2.2</b> | <b>Controle da luminária . . . . .</b>                         | <b>51</b> |
| 3.2.2.1      | Fluxograma do sistema de controle . . . . .                    | 52        |
| 3.2.2.2      | Circuito de controle . . . . .                                 | 52        |
| 3.2.2.3      | Fonte auxiliar e alimentação . . . . .                         | 54        |
| 3.2.2.4      | Interface de controle . . . . .                                | 55        |
| <b>3.2.3</b> | <b>Ensaio de validação do sistema . . . . .</b>                | <b>57</b> |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS . . . . .</b>                                    | <b>58</b> |
| 4.1          | Ensaio fotométrico . . . . .                                   | 58        |
| 4.2          | Ensaio elétrico . . . . .                                      | 61        |
| 4.3          | Ensaio térmico . . . . .                                       | 62        |
| 4.4          | Comparação entre uma lâmpada comercial e o protótipo . . . . . | 64        |
| <b>4.4.1</b> | <b>Fase vegetativa . . . . .</b>                               | <b>65</b> |
| <b>4.4.2</b> | <b>Fase de floração . . . . .</b>                              | <b>67</b> |
| <b>5</b>     | <b>CONCLUSÃO . . . . .</b>                                     | <b>71</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>                                   | <b>73</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma contextualização sobre o tema abordado neste trabalho. Primeiramente, são fornecidas algumas informações sobre a planta objeto deste estudo, incluindo seu uso medicinal, origem e aspectos econômicos relacionados à sua exploração. Além disso, é feita uma breve introdução aos Diodos emissores de luz (LEDs) do inglês *Light Emitting Diodes*, que constituem o principal componente eletrônico utilizado no desenvolvimento da luminária proposta neste trabalho.

Entre as espécies historicamente utilizadas para fins medicinais, a *Cannabis sativa L.* - planta de estudo desse trabalho - destaca-se por sua ampla aplicação e peculiaridades morfológicas, características que a tornam facilmente identificável. Diversas culturas ao longo da história recorreram a plantas em práticas terapêuticas e na medicina tradicional. Algumas dessas espécies apresentam propriedades alucinógenas, enquanto outras, quando combinadas com diferentes substâncias, podem atuar como sedativos. Entre elas, a *Cannabis Sativa L.* é uma das mais conhecidas. Trata-se de uma planta arbustiva que pode alcançar entre 2,5 e 4 metros de altura, facilmente identificada pelas folhas compostas em formato palmado (semelhante a uma mão aberta), com bordas serrilhadas bem características, além de liberar um aroma característico e marcante (Santos, 1997).

Compreender a morfologia da *Cannabis Sativa L.* ajuda a contextualizar sua classificação botânica e a diversidade de subespécies presentes no gênero. A *Cannabis sativa L.* é uma planta herbácea pertencente à família *Cannabaceae*, sua adaptação a diferentes climas contribuiu para que se espalhasse por diversas regiões do mundo. O gênero *Cannabis* é geralmente tratado como composto por uma única espécie, a “sativa”, que engloba várias subespécies ou variedades, como *Cannabis sativa ssp. sativa*, *C. sativa ssp. indica*, *C. sativa ssp. ruderalis* e *C. sativa ssp. afghanica*. A planta tem sido utilizada pela humanidade desde tempos antigos, com registros históricos apontando seus diferentes usos medicinais, industriais e recreativos ao redor do mundo (Hourfane *et al.*, 2023).

Além de sua diversidade botânica, registros históricos mostram que a *Cannabis* possuía significativa relevância terapêutica desde a Antiguidade. O uso medicinal da *Cannabis* é registrado em textos antigos e medievais. Na China, por volta de 3750 a.C., o lavrador e filósofo Shen Nung governava a região e introduziu práticas de civilização em meio a conflitos internos por terras férteis. Ele é responsável pela elaboração da primeira farmacopéia conhecida, o *Pen Ts’ao*, na qual a *Cannabis* figurava entre os elixires “superiores” de imortalidade. Nesse contexto, a planta fêmea era associada à energia yin, em contraste com a energia yang do macho. A energia yin era recomendada para o tratamento de condições ligadas à saúde feminina, como distúrbios menstruais, além de reumatismo, febre beribéri, malária, desatenção e outras enfermidades. A influência de Shen Nung ainda é observada hoje em nomes de regiões chinesas,

como Shen Dong, província conhecida pelo cultivo regular de Cannabis (Conrad, 2001).

O potencial terapêutico da Cannabis está relacionado à grande diversidade de compostos químicos presentes em suas amostras, sendo os canabinoides a principal classe. Esses compostos contêm 21 átomos de carbono e incluem, entre os mais estudados: o  $\Delta^9$ -Tetrahidrocanabinol (THC), responsável pelos efeitos psicoativos e utilizado no tratamento de náuseas e vômitos em pacientes oncológicos; o Canabidiol (CBD), conhecido por suas propriedades analgésicas e antiepiléticas, empregado no manejo de enxaqueca e prevenção de convulsões; o Canabinol (CBN), indicado para aliviar sintomas de condições neurológicas, como epilepsia, convulsões e rigidez muscular; o Ácido tetra-hidrocanabinólico (THCA), que apresenta potencial anti-inflamatório útil em artrite e doenças autoimunes, além de auxiliar em sintomas de Parkinson e Esclerose lateral amitrófica (ELA); e o Cannabigerol (CBG), estudado por seu efeito na redução de ansiedade, transtorno obsessivo-compulsivo, transtorno de estresse pós-traumático e depressão. Os canabinoides podem ser classificados como meroterpenos (terpeno-fenóis) e são exclusivos da Cannabis, não tendo sido isolados em outras espécies vegetais ou animais. Além disso, a planta contém ácidos carboxílicos, análogos e potenciais produtos de transformação de seus principais compostos, ampliando seu leque de aplicações terapêuticas (Silva; Silva; Dantas, 2023; Medeiros *et al.*, 2020)

O reconhecimento científico e terapêutico da Cannabis reflete-se diretamente em seu mercado, cujo crescimento evidencia a relevância econômica da planta. O mercado da Cannabis medicinal no Brasil tem apresentado crescimento expressivo nos últimos anos. De acordo com dados divulgados pela *startup* Kaya Mind, especializada em inteligência de mercado no setor, aproximadamente 430 mil brasileiros realizam atualmente tratamentos com medicamentos à base de Cannabis, movimentando cerca de R\$ 699 milhões em 2023. Esse levantamento faz parte do II Anuário da Cannabis Medicinal no Brasil, em parceria com informações da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) (Medicina S/A, 2023).

Segundo o relatório, o acesso aos medicamentos ocorre de diferentes formas: aproximadamente 219 mil pacientes importam produtos de Cannabis, 97 mil os adquirem diretamente em farmácias e cerca de 114 mil realizam o tratamento por meio de associações. Esses usuários estão distribuídos em mais de 3.671 municípios, o que corresponde a 66% das cidades brasileiras (Medicina S/A, 2023).

As projeções indicam que, em 2024, o mercado alcançaria a marca de R\$ 1 bilhão no país. Para efeito de comparação, em 2018 o setor movimentava apenas R\$ 3,7 milhões, evidenciando um crescimento exponencial. Além disso, caso ocorra uma regulamentação mais ampla, que abranja os usos medicinais, industriais e recreativos da planta, o setor poderia gerar até R\$ 26,1 bilhões à economia nacional em um período de quatro anos (Medicina S/A, 2023).

Para viabilizar o cultivo controlado de Cannabis em ambientes fechados e otimizar sua produção, tecnologias de iluminação, especialmente LEDs, têm se mostrado fundamentais. Por definição, o diodo emissor de luz (LED) é um componente eletrônico semicondutor capaz de

transformar energia elétrica em energia luminosa sem a necessidade de filamentos metálicos, radiação ultravioleta ou descarga de gases. Trata-se de um dispositivo bipolar, com terminais denominados cátodo e ânodo, que, quando corretamente polarizados, permitem a passagem de corrente elétrica e a consequente emissão de luz (Santos *et al.*, 2015). Avanços tecnológicos recentes nesse tipo de dispositivo possibilitaram sua aplicação em diversos cenários que demandam controle da luminosidade e eficiência energética, como na horticultura. Nessa área, a utilização de LEDs é especialmente relevante, pois alterações sutis na composição espectral da luz, em sua quantidade ou periodicidade, podem provocar respostas fisiológicas significativas nas plantas. Assim, os LEDs apresentam-se como um dispositivo eletrônico eficiente para o controle e o ajuste desses parâmetros, viabilizando práticas de cultivo mais precisas e produtivas em ambientes como estufas, onde a luz artificial é empregada para compensar a baixa disponibilidade de radiação natural (Dorais; Gosselin, 2002).

## 1.1 OBJETIVOS

Tendo como base referências científicas sobre iluminação hortícola, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar uma luminária que opere com um espectro principal para todo o ciclo da planta, complementado por um segundo espectro acionado especificamente durante a fase de floração.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Definir conceitos e variáveis necessárias para a obtenção de resultados que permitam avaliar os impactos da iluminação no cultivo de plantas medicinais.
2. Modelar os sistemas de controle propostos, considerando aspectos técnicos e funcionais.
3. Implementar um protótipo de luminária com ênfase na análise da intensidade, qualidade e composição espectral da luz.
4. Validar os efeitos do protótipo no desenvolvimento das plantas através da análise do tamanho e da floração da planta.

## 1.2 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

A pesquisa concentra-se no desenvolvimento de sistemas de iluminação energeticamente eficientes, com espectros luminosos direcionados ao cultivo de plantas medicinais. Para tanto, são descritas e especificadas as principais características de entrada e saída do projeto, tais como: corrente, tensão e potência elétrica; emissão eletromagnética; distribuição espectral; distância da luminária em relação às plantas; além do período de exposição das plantas à iluminação artificial.

O escopo deste trabalho não abrange o desenvolvimento de um conversor estático inédito para acionamento dos LEDs, mas contempla o projeto e implementação de um sistema de controle para a fonte de alimentação utilizada. Assim, o estudo se apoia em topologias de conversores já consolidadas, dedicando-se ao controle da operação e ao gerenciamento do espectro luminoso emitido.

Por fim, os ensaios experimentais do protótipo foram realizados no Crisântemo (*Chrysanthemum morifolium*), utilizado como planta modelo em substituição à **Cannabis sativa L.**, em função da legislação brasileira vigente.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem como objetivo apresentar os principais conceitos fundamentais para o desenvolvimento da luminária com controle espectral. Serão discutidos aspectos relacionados à importância da luz no crescimento e desenvolvimento das plantas, bem como noções de fenologia, fotoperíodo e processos fisiológicos que sofrem influência direta da qualidade, intensidade e periodicidade da iluminação.

### 2.1 A LUZ E SEU PAPEL NO DESENVOLVIMENTO DAS PLANTAS

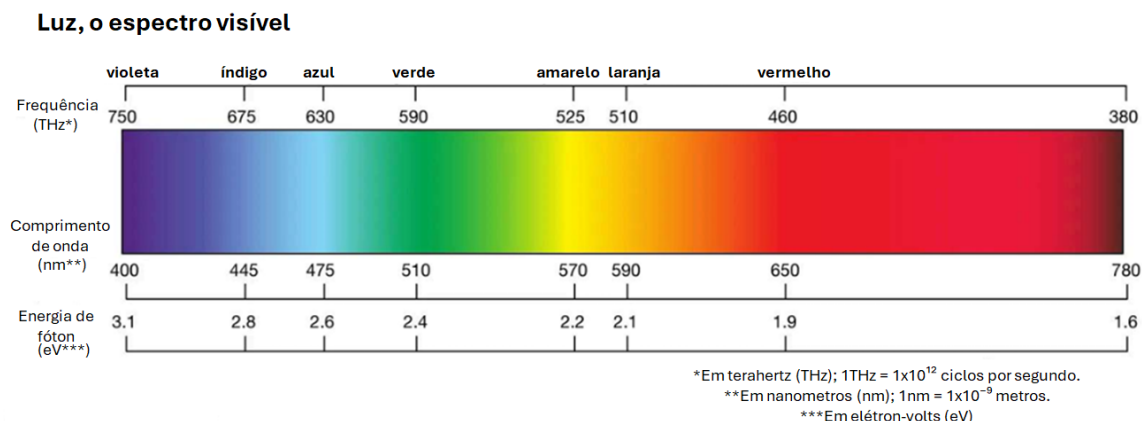
Na Física Clássica, a luz é descrita como uma radiação eletromagnética composta por campos elétricos e magnéticos acoplados, que se propagam pelo espaço na forma de onda. Essa abordagem é adequada principalmente para a luz visível ao olho humano, com comprimentos de onda entre aproximadamente 400 e 700 nanômetros. No entanto, ela não explica fenômenos observados em baixas intensidades ou nas interações da luz com átomos e moléculas. A teoria quântica complementa essa visão, descrevendo a luz como composta por fótons, pacotes discretos de energia. Apesar disso, nem a teoria clássica nem a quântica, isoladamente, conseguem capturar completamente a natureza da luz. Esta apresenta uma dualidade surpreendente, manifestando-se simultaneamente como onda e partícula, característica que também é observada em outros constituintes fundamentais da matéria, como os elétrons, que exibem propriedades tanto ondulatórias quanto corpusculares (Stark, 2025).

Desde meados do século XX, uma teoria mais abrangente, conhecida como Eletrodinâmica quântica (QED) do inglês *Quantum electrodynamics*, passou a ser considerada pelos físicos como a formulação mais completa sobre a luz. Desenvolvida de forma independente por Richard Feynman, Julian S. Schwinger e Tomonaga Shin'ichirō, a QED descreve não apenas as interações entre a radiação eletromagnética e partículas carregadas, mas também as interações entre as próprias partículas carregadas. Nessa teoria, os campos elétricos e magnéticos descritos pelas equações de Maxwell são quantizados, e os fótons surgem como excitações desses campos (Stark, 2025).

A QED estabelece ainda que os fótons são os mediadores das forças eletromagnéticas: duas partículas eletricamente carregadas se repelem devido à troca de fótons virtuais, cuja existência não pode ser detectada diretamente, pois violaria as leis de conservação de energia e momento. Por outro lado, fótons podem ser emitidos em estado livre por partículas carregadas, tornando-se observáveis como luz ou outras formas de radiação eletromagnética (Stark, 2025).

Na Figura 1 são apresentadas as unidades de medida da luz, evidenciando sua natureza dual: como onda, representada pelos comprimentos de onda entre 400 e 780 nm, e como energia, associada à quantidade de fótons em cada faixa espectral (Stark, 2025).

Figura 1 – Representação da luz como onda e como energia



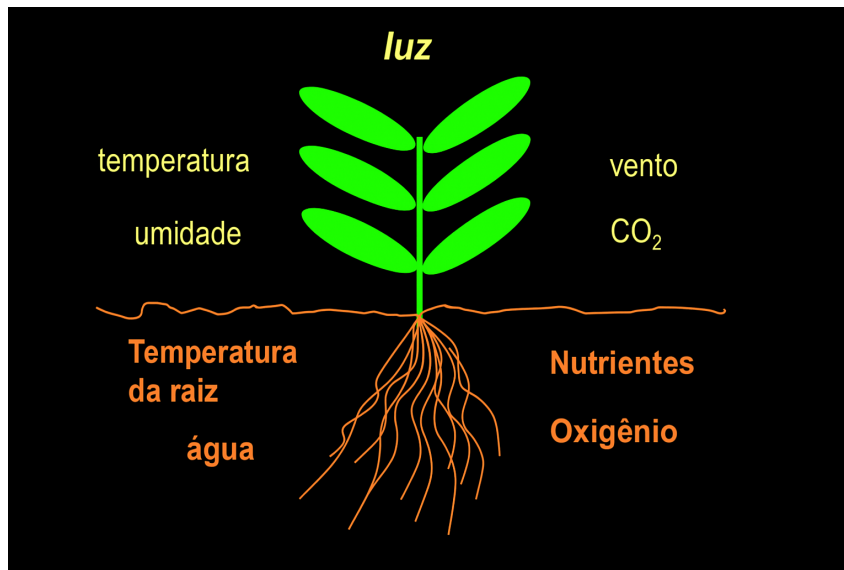
Fonte: Adaptado de Stark, 2025.

A luz constitui um dos principais parâmetros ambientais que regulam a fisiologia vegetal ao longo de todo o ciclo de vida das plantas, conforme ilustrado na Figura 2 atuando de duas formas complementares: como fonte de energia e como sinal regulador. A chamada função assimilativa refere-se ao papel da luz como fonte primária de energia para a fotossíntese, processo no qual o Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ) é fixado e convertido em compostos orgânicos indispensáveis ao crescimento e à produção das plantas. Já a função de controle corresponde ao uso da luz como sinal ambiental, regulando processos fisiológicos e morfológicos fundamentais, como germinação, estabelecimento de plântulas, arquitetura da planta, metabolismo e florescimento. Os primeiros estudos sobre fotomorfogênese concentraram-se justamente nesses aspectos morfológicos das respostas das plantas, evidenciando que tais processos são diretamente regulados pela luz. A quantidade (intensidade e fotoperíodo) e a qualidade da luz (composição espectral) afetam o crescimento e a fisiologia vegetal, interagindo ainda com outros parâmetros ambientais e fatores de cultivo. Assim, além de fornecer energia para a fotossíntese, a luz atua como um sinal específico que orienta o desenvolvimento, o metabolismo e a conformação das plantas, caracterizando o fenômeno complexo da fotomorfogênese, determinado pelos diferentes comprimentos de onda da luz (Devlin; Christie; Terry, 2007; Paradiso; Proietti, 2022).

### 2.1.1 Fotosíntese

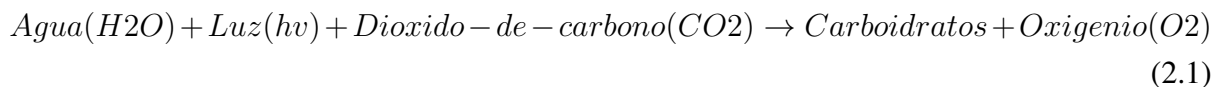
A fotossíntese é um processo essencial para a manutenção da vida vegetal e para a ocorrência de reações bioquímicas, pois permite a conversão da energia luminosa em energia química. Durante esse processo, as folhas captam a radiação incidente e direcionam o fluxo de elétrons fotossintéticos aos cloroplastos, organelas fundamentais das plantas, responsáveis pela regulação da fotossíntese, biogênese e manutenção estrutural. Em conjunto com a luz, a água e o dióxido de carbono são utilizados para a produção de carboidratos, conforme representado na

Figura 2 – Principais parâmetros ambientais



Fonte: Adaptado de Crop Physiology laboratory Utah state University

equação 2.1 (Wang *et al.*, 2024; Sloper, 2020).



As clorofilas constituem provavelmente o grupo de pigmentos vegetais mais conhecido. São complexos de absorção de luz localizados nos cloroplastos dos tecidos foliares, de cor verde, presentes em todas as plantas e algas. Como principais fotorreceptores, as clorofilas são essenciais à fotossíntese, absorvendo a energia dos fótons aos quais a planta é exposta. As plantas verdes utilizam principalmente as clorofilas A e B para captar luz durante a fotossíntese, enquanto as clorofilas C1, C2, D e F são geralmente encontradas em plantas inferiores, como algas e diatomáceas (Gao *et al.*, 2023). Além de fornecer energia para a fotossíntese, a intensidade luminosa atua como um sinal regulador das respostas fisiológicas das plantas, influenciando diretamente seu crescimento e desenvolvimento (Wang *et al.*, 2024).

### 2.1.2 Fotoperíodo

As plantas são altamente sensíveis às mudanças em seu ambiente, particularmente às variações no fotoperíodo, ou duração do dia. O fotoperiodismo é a capacidade das plantas de perceber essas variações e utilizá-las para regular processos essenciais do desenvolvimento, como crescimento, floração e períodos de repouso vegetativo. Por meio desse mecanismo, as plantas ajustam seu ciclo de vida em função da quantidade de luz recebida diariamente, sincronizando eventos críticos, como o momento da floração. De acordo com suas respostas ao fotoperíodo, as plantas podem ser classificadas em três grupos: *Short day plants* (SDPs), *Long day plants* (LDPs) e *Day neutral plants* (DNPs) (Sun *et al.*, 2022).

Plantas de dia curto (ou de noite longa) iniciam a formação de flores ou frutos à medida que a duração do dia diminui e a da noite aumenta – geralmente após o solstício de verão. Esse grupo inclui flores de floração outonal e culturas que produzem frutos no outono, como poinsettia, crisântemo, algodão, arroz e cannabis/cânhamo. Plantas neutras em relação ao fotoperíodo não dependem da duração do dia para florescer ou frutificar. Elas realizam esses processos automaticamente ao atingirem determinado tamanho ou idade, ou quando condições ambientais, como temperatura ou umidade, atingem faixas específicas. Exemplos incluem tulipas, tomates e diversas árvores. Plantas de dia longo (ou de noite curta) iniciam a floração quando as noites começam a encurtar. Entre elas, destacam-se hortaliças e flores comuns, como alface, rabanete, espinafre, batata, girassol e margaridas. Na prática, para plantas de dia curto recomenda-se cultivar sementes ou estacas sob 18 horas de luz diárias, reduzindo posteriormente para 12 horas de luz para induzir a floração. Para plantas neutras, mantém-se um regime de 18 horas de luz diária. Já para plantas de dia longo, inicia-se com 12 horas de luz, aumentando para 18 horas diárias para induzir a floração. Em todos os casos, é fundamental assegurar períodos de escuridão contínua quando as luzes estiverem apagadas. Na Tabela 1 pode-se observar um resumo sobre o fotoperíodo (Sloper, 2020).

|                         | <b>Dias curtos</b>                          | <b>Dias neutros</b>         | <b>Dias longos</b>              |
|-------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Floração e frutificação | Quando a noite é maior                      | Independente do fotoperíodo | Quando a noite é curta          |
| Exemplos                | Algodão,<br>Crisântemo,<br>Cannabis/Cânhamo | Rosas, Tomates,<br>Pepino   | Espinafre, Alface,<br>Gramíneas |
| Fotoperíodo de floração | 12 horas ou menos                           | Independente                | 14–18 horas                     |

Tabela 1 – Classificação de plantas por duração do dia e fotoperíodo para floração.

### 2.1.3 Composição espectral e fotoreceptores

Em 1972, McCree demonstrou que, sob a mesma intensidade luminosa, a eficiência fotossintética varia de acordo com a composição espectral. Em grande parte das espécies vegetais, os comprimentos de onda mais eficazes para a fotossíntese encontram-se nas regiões do azul e do vermelho, seguindo uma tendência intimamente relacionada ao espectro de absorção dos pigmentos fotossintéticos (Paradiso; Proietti, 2022).

Atualmente, sabe-se que diferentes faixas do espectro luminoso transmitem sinais específicos aos fotoreceptores das plantas, os quais induzem a expressão de genes relacionados a funções fisiológicas e metabólicas. Cada classe de fotoreceptor é capaz de perceber comprimentos de onda distintos: luz azul (445–500 nm), verde (500–580 nm), vermelha (620–700 nm), vermelho distante (700–775 nm), além das radiações Ultravioleta (UV) do tipo UV-A

(315–380 nm) e UV-B (280–315 nm). Nesse contexto, cinco classes principais de proteínas fotorreceptoras foram caracterizadas como iniciadoras das respostas vegetais à luz. A família dos fitocromos é responsável pela absorção das faixas de vermelho e vermelho distante, enquanto criptocromos, fototropinas e o complexo ZTL/FKF1/LKP2 respondem à luz azul e ao UV-A. Já o fotorreceptor UVR8 apresenta sensibilidade específica à radiação UV-B (Paradiso; Proietti, 2022).

Figura 3 – Especificidade de comprimento de onda dos principais fotorreceptores das plantas e respostas de fotomorfogênese associadas.

| Comprimento de onda                                                                                                         | Fotoreceptores | Respostas das plantas                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  vermelho, vermelho-distante (600-750 nm) | PHYs           | Germinação, Desestiolamento, evitar sombra, Inibição do caule, Alongamento do pecíolo, Expansão da folha e achatamento, ritmos circadianos, Floração, Ramificação                               |
| verde (530-570 nm)                                                                                                          |                |                                                                                                                                                                                                 |
| azul (390-500 nm)                                                                                                           | CRYs           | Desestiolamento, Inibição do caule, Alongamento do pecíolo, Expansão da folha, Ritmos circadianos, Floração, Ramificação, Biossíntese de flavonóides, Resposta à sombra pela fotopercepção B/G. |
| UV-A (320-390 nm)                                                                                                           | PHOTs          | Achatamento de folhas, Fototropismo, Abertura estomática, Realocação de cloroplastos                                                                                                            |
| UV-B (290-315 nm)                                                                                                           | ZTL/FKF1/LKP2  | Ritmos circadianos, Floração                                                                                                                                                                    |
|                                                                                                                             | UVR8           | Desestiolamento, Biossíntese de flavonoides                                                                                                                                                     |

Fonte: Adaptado de Paradiso; Proietti, 2022

### 2.1.3.1 Fitocromos

Os Fitocromos (PHYs) são fotorreceptores que regulam o desenvolvimento das plantas por meio da fotomorfogênese, um processo no qual a morfologia e o metabolismo vegetal são definidos em resposta à luz. Essa regulação ocorre pela interconversão entre duas formas moleculares: Pr (do inglês *Phytocrome red*), inativa e sensível à luz vermelha e Pfr (do inglês *Phytocrome far red*), ativa e sensível ao vermelho-distante. O equilíbrio entre essas formas depende da razão espectral Vermelho (R)/Vermelho distante (FR), parâmetro diretamente influenciado pela qualidade da iluminação. Esse balanço regula respostas como evitação de sombra, floração e crescimento do xilema - tecido condutor responsável por transportar água e sais minerais - sendo determinante no ciclo produtivo. Em *Cannabis sativa*, por exemplo, as apoproteínas PHYA, PHYB e PHYC exercem funções-chave nesses processos, com atuação modulada por Fatores de interação (PIFs) do inglês *Phytochrome-Interacting Factors*, que também podem

afetar a síntese de compostos secundários, como terpenos (Paradiso; Proietti, 2022; Reichel *et al.*, 2024; Venturas; Sperry; Hacke, 2017).

Do ponto de vista prático, valores baixos da razão R:FR tendem a estimular alongamento de caules e expansão foliar, aumentando a interceptação luminosa e, conseqüentemente, a biomassa total. Contudo, esse ganho estrutural pode vir acompanhado de redução na concentração de metabólitos secundários, devido a efeitos de diluição. Dessa forma, controlar a razão espectral emitida pelas fontes de luz não só define a arquitetura da planta, mas também impacta diretamente a qualidade química do produto final (Reichel *et al.*, 2024).

### 2.1.3.2 Criptocromos

Os Criptocromos (CRYs) são fotorreceptores sensíveis à luz azul, violeta e pequenas quantidades de UV-A, atuando na regulação do tamanho e da forma das plantas tanto de forma isolada quanto em sinergia com os (PHYs). Ele influencia o relógio circadiano, responsável pela percepção dos ciclos de dia e noite, e participa do fototropismo – fenômeno em que as plantas se orientam em direção à luz, como observado em girassóis, cujas flores seguem o movimento do sol ao longo do dia. CRYs também afetam processos-chave como fotomorfogênese, escape à sombra, controle do tempo de floração, desenvolvimento radicular, abertura estomática, altura das plantas e dominância apical, dormência de sementes e senescência foliar (Wang *et al.*, 2014; Sloper, 2020).

Além disso, CRYs e PHYs respondem parcialmente à luz verde, embora essa faixa não possua um fotossensor específico. Eles absorvem porções da luz verde com menor sensibilidade do que à luz azul e vermelha. A razão azul/verde funciona como um sinal fino para a resposta da planta à sombra, complementando a percepção vermelho/vermelho distante e modulando o escape à sombra. Estudos indicam que a luz verde até 530 nm contribui para a resposta à luz azul mediada por CRYs e fototropinas, enquanto comprimentos de onda maiores, na faixa verde/amarelo (até 570 nm), podem inativar os CRYs induzidos pela luz azul, explicando o efeito antagonista entre luz verde e azul na fotopercepção pelas plantas (Paradiso; Proietti, 2022).

### 2.1.3.3 Fototropinas

As Fototropinas (PHOTs) são receptores de luz azul nas plantas que regulam respostas essenciais para otimizar a fotossíntese e reduzir danos causados por intensidade luminosa inadequada. Entre essas respostas estão o movimento das folhas e cloroplastos, o fototropismo e a abertura dos estômatos (Christie, 2007; Paradiso; Proietti, 2022).

Ademais, em estudos de biologia molecular, celular e evolutiva de plantas, as fototropinas PHOT1 e PHOT2 foram estudadas detalhadamente, revelando que a percepção da luz azul ocorre por meio de domínios sensoriais chamados *Light oxygen voltage* (LOV) que são subdivididos em LOV1 e LOV2, ligados a moléculas de flavina. A luz provoca alterações na fototropina

que iniciam uma sinalização celular, desencadeando as respostas mencionadas. PHOT2 é ativada pela luz azul, enquanto PHOT1 é parcialmente inibida, permitindo respostas específicas para diferentes intensidades e posições da luz (Koch, 2019; Teixeira, 2020).

#### 2.1.3.4 Família Zeirlupe

A família Zeirlupe de fotorreceptores, composta pelas proteínas ZEIRLUPE (ZTL), FLAVIN BINDING, KELCHREPEAT, F-BOX (FKF1) e LOVKELCHPROTEIN2 (LKP2), é sensível à luz UV-A e azul. Cada uma dessas proteínas possui um domínio LOV, um F-box (envolvido na degradação de proteínas) e seis repetições KELCH (que reconhecem proteínas-alvo). Esses fotorreceptores formam complexos conhecidos como SCF E3 ubiquitina ligase, que degradam proteínas específicas em resposta à luz, regulando processos fundamentais como a floração fotoperiódica, o relógio circadiano e o crescimento do hipocótilo (parte da planta entre a raiz e a primeira folha) (Teixeira, 2020). O mecanismo de ação ocorre quando a luz azul ativa os domínios LOV, permitindo que ZTL, FKF1 e LKP2 interajam com a proteína GIGANTEA (GI) - proteína nuclear, específica de plantas, que está envolvida em diversos processos fisiológicos, como regulação do tempo de floração, controle do ritmo circadiano, alongamento do hipocótilo, acúmulo de amido e clorofila, além de respostas a estresses ambientais como frio, seca e herbicidas. O complexo formado promove a degradação de proteínas repressoras, liberando a expressão de genes fundamentais para a indução da floração. Assim, esses fotorreceptores permitem que a planta sincronize a floração e ajuste seu ritmo biológico diário de acordo com o ambiente luminoso (Mishra; Panigrahi, 2015; Teixeira, 2020).

#### 2.1.3.5 UV RESISTANCE LOCUS 8

O fotorreceptor UV RESISTANCE LOCUS 8 (UVR8) é o sensor da planta para a radiação UV-B, funcionando como um sistema de defesa contra esse tipo de estresse luminoso. Quando ativado, ele dispara mudanças na expressão de genes que levam à produção de compostos protetores, como os flavonóis, que atuam como uma espécie de filtro solar natural. Além disso, o UVR8 influencia processos importantes, como o movimento dos estômatos, o alinhamento da planta em relação à luz e a regulação do seu relógio biológico interno (Teixeira, 2020).

No nível molecular, o UVR8 fica inativo em forma de par, mas ao receber UV-B se separa e passa a interagir com proteínas no núcleo da célula, ativando genes relacionados à proteção contra a radiação. Em doses baixas e controladas, esse mecanismo fortalece a resistência das plantas a pragas e doenças. Porém, quando a exposição à radiação UV-B é muito intensa ou prolongada, ocorre a geração de radicais livres que danificam o Ácido desoxirribonucleico (DNA), proteínas e pigmentos fotossintéticos, reduzindo o crescimento e a produtividade (Teixeira, 2020).

## 2.1.4 Composição espectral no crescimento e desenvolvimento das plantas

O processo fotobiológico nas plantas é impulsionado pela quantidade de fótons incidentes, e não pela energia ou pelo fluxo luminoso. Isso ocorre porque os fótons excitam elétrons nos pigmentos fotossensíveis, sendo, portanto, a contagem de fótons o parâmetro determinante para as respostas fisiológicas. Os fótons precisam apresentar energia suficiente para ativar os fotorreceptores específicos, os quais possuem diferentes sensibilidades espectrais. Essas sensibilidades são descritas por funções de resposta em determinados comprimentos de onda, obtidas a partir de análises biofísicas ou empíricas (Kusuma; Pattison; Bugbee, 2020).

Além disso, o efeito da qualidade espectral sobre o desenvolvimento e a morfologia das plantas não ocorre de forma isolada. Os comprimentos de onda interagem entre si, apresentando efeitos sinérgicos que variam conforme a intensidade luminosa aplicada e a espécie em estudo. Dessa forma, compreender a composição espectral adequada é essencial para otimizar processos de crescimento, floração e respostas adaptativas das plantas ao ambiente luminoso (Kusuma; Pattison; Bugbee, 2020).

### 2.1.4.1 Fótons ultravioleta

Existem três faixas de radiação ultravioleta (UV): UV-A, UV-B e UV-C. Cada uma possui características, aplicações e riscos diferentes (Sloper, 2020). A Tabela 2 a seguir explica as diferenças.

| Faixa UV | Comprimento de onda               | Aplicações                          | Outros                                                |
|----------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| UV-A     | 320–400 nm " <i>Long Wave</i> "   | Luz negra                           | Estimulação nos criptocromos e aumento de flavonoides |
| UV-B     | 280–329 nm " <i>Medium Wave</i> " | Lâmpadas para répteis e fototerapia | Redução de pragas e fungos                            |
| UV-C     | 200–280 nm " <i>Short Wave</i> "  | Germicida                           | Grande parte filtrado pela atmosfera                  |

Tabela 2 – Diferença entre as faixas de radiações ultravioleta

A radiação UV-C, embora extremamente nociva, não chega ao nível do solo devido à filtragem pela atmosfera. O UV-B, por sua vez, apresenta caráter ambivalente: pode causar danos celulares, como mutações no DNA e degradação de pigmentos, mas também atua como sinal ambiental capaz de induzir respostas positivas, incluindo o aumento da síntese de metabólitos secundários. Estudos demonstram que esses efeitos estão associados a diferentes vias de sinalização dependentes da intensidade da radiação UV-B, sendo que, em baixas doses, o fotorreceptor UV RESISTANCE LOCUS 8 (UVR8) é ativado e desencadeia mecanismos específicos de adaptação. Já a radiação UV-A é menos agressiva do que o UV-B e seus impactos

no crescimento vegetal podem ser tanto benéficos quanto prejudiciais, dependendo da espécie e das condições ambientais em que a planta se encontra (Dou; Niu; Gu, 2019; Kusuma; Pattison; Bugbee, 2020).

#### 2.1.4.2 Fótons Azuis

A faixa de luz azul (400–500 nm) tende a reduzir a altura das plantas e a expansão foliar na maioria das espécies. Apesar de os fótons azuis apresentarem cerca de 20% menos eficiência fotossintética em comparação com os fótons vermelhos de LEDs a 660 nm, o principal impacto da luz azul no crescimento está relacionado à diminuição da área foliar, que reduz a capacidade de captura de luz. Entretanto, a luz azul também melhora a eficiência fotossintética ao otimizar a absorção de luz e ativar mecanismos de reparo que protegem a planta de fotodanos. Além disso, exerce papel fundamental na regulação do crescimento vegetal por meio da ativação de fotoreceptores especializados, como criptocromos (CRYs) e fototropinas (PHOTs). Em sistemas de cultivo controlado, normalmente se emprega entre 5% e 30% de luz azul na iluminação com LEDs hortícolas, justamente para limitar o alongamento excessivo do caule e controlar a altura das plantas, favorecendo um desenvolvimento mais compacto (Chibani; Gherli; Fan, 2025; Kusuma; Pattison; Bugbee, 2020).

#### 2.1.4.3 Fótons verdes

A faixa de luz verde (500–600 nm), embora tradicionalmente subestimada na fotossíntese, desempenha um papel importante tanto para as plantas quanto para a percepção humana de cores. As plantas não refletem 100% da luz verde; muitas absorvem entre 70% e 90% da radiação à qual são expostas, e a luz refletida por uma folha pode ser aproveitada por outra. Os carotenoides também absorvem luz verde, promovendo o espessamento das folhas e aumentando a captura de luz. Além disso, a luz verde penetra mais profundamente no dossel das plantas do que a luz azul ou vermelha, favorecendo a fotossíntese em folhas mais internas (Sloper, 2020; Kusuma; Pattison; Bugbee, 2020).

LEDs verdes puros (monocromáticos) apresentam baixa eficácia, por isso geralmente se utilizam LEDs brancos (conversão de fósforo) que fornecem fótons verdes juntamente com azul e vermelho. Para as plantas, os fótons verdes são até 10% menos eficientes fotosinteticamente do que os fótons vermelhos (660 nm), mas, devido à maior penetração, podem influenciar a forma e o crescimento vegetal (Kusuma; Pattison; Bugbee, 2020).

#### 2.1.4.4 Fótons vermelhos

A luz vermelha monocromática (660 nm, com *bandwidth* 25 nm) está próxima do comprimento de onda ideal para absorção por clorofilas e fitocromos, apoiando de forma direta tanto a fotossíntese quanto o desenvolvimento morfológico das plantas. Essa radiação aumenta

a fotossíntese foliar, eleva os níveis de clorofila, favorece o acúmulo de biomassa e melhora o rendimento geral das culturas, razão pela qual os fótons vermelhos (600–700 nm) são amplamente utilizados em sistemas de cultivo com LEDs. Estudos clássicos também apontaram um papel antagônico entre vermelho e vermelho distante na regulação de respostas de evitamento de sombra, como alongamento de caules e redução da ramificação. Entretanto, devido à alta absorção da luz vermelha pela clorofila, seu efeito isolado nessas respostas pode ter sido parcialmente superestimado, uma vez que outros fatores também contribuem para o fenômeno. Ainda assim, a ausência de fótons vermelhos resulta em rápido alongamento caulinar e crescimento desbalanceado, evidenciando a sua importância no equilíbrio morfológico das plantas (Qiao *et al.*, 2025; Kusuma; Pattison; Bugbee, 2020).

#### 2.1.4.5 Fótons brancos

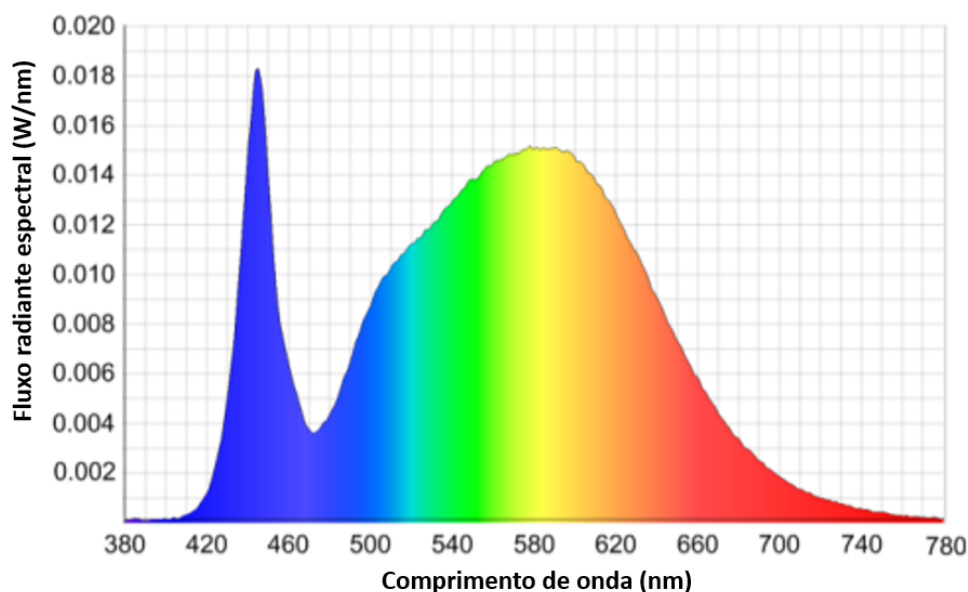
A luz branca têm ganhado destaque no cultivo de plantas devido ao seu espectro amplo e contínuo, mais semelhante ao da luz solar quando comparado a LEDs monocromáticos. A luz natural apresenta um extenso intervalo de comprimentos de onda e intensidade, sendo considerada o padrão ideal para o desenvolvimento vegetal. Assim, fontes artificiais que melhor simulam esse espectro tendem a favorecer respostas fotossintéticas e morfológicas mais equilibradas. Estudos demonstram que LEDs brancos fornecem uma combinação integrada de radiação azul, verde e vermelha, cobrindo regiões do espectro com impactos distintos sobre o crescimento, fisiologia e metabolismo das plantas (Holweg, 2024; Nguyen *et al.*, 2021). Na Figura 4 pode-se observar a faixa de espectro do LED branco.

Além disso, o espectro amplo e perceptualmente neutro dos LEDs brancos melhora significativamente a capacidade de inspeção visual do cultivo, permitindo identificar de forma mais clara sinais de estresse, cloroses, necroses, pragas ou deficiências — uma dificuldade comum em sistemas que utilizam predominantemente LEDs azul-vermelho, que distorcem a percepção de cores. Essa limitação é ainda mais evidente nos chamados módulos *blurple*, compostos apenas por LEDs azuis e vermelhos, cuja emissão púrpura reduz a acuidade visual, dificulta a identificação de problemas nas plantas e pode até causar desconforto ou perturbação temporária da visão ao retornar à luz ambiente (Randall; Lopez, 2014; Sloper, 2020). Na Figura 5 pode-se observar uma comparação entre a incidência de luz branca e a luz *blurple*.

#### 2.1.4.6 Fótons vermelhos distantes

A radiação vermelho distante (*far-red*) atua como um regulador importante da morfologia vegetal, mediada principalmente pelo sistema de fitocromos. Esse fotorreceptor existe em dois estados interconversíveis: Pr, que absorve comprimentos de onda entre 650 e 670 nm, e Pfr, sensível à faixa de 705 a 740 nm (fora do espectro fotossintético ativo). A proporção entre essas duas formas fornece à planta informações sobre a qualidade da luz recebida, modulando características estruturais como altura, área foliar e distância internodal (Sloper, 2020).

Figura 4 – Representação do espectro do LED branco



Fonte: Adaptado de Hrbac, 2019.

Figura 5 – Comparação entre a luz *blurple* e a luz branca em uma planta medicinal



Fonte: Adaptado de Jump Lights, 2025.

Quando expostas a altos níveis de *far-red*, muitas espécies apresentam aumento da área foliar e do alongamento caulinar. Esse comportamento está associado ao mecanismo de evitação de sombra, no qual a planta interpreta que outra vegetação está absorvendo a luz vermelha disponível. Como resposta adaptativa, cresce mais em altura para tentar alcançar melhor iluminação. Em culturas não reprodutivas, como a alface, esse estímulo pode favorecer maior interceptação de fótons e incremento de biomassa. Já em espécies de interesse florífero, o excesso de *far-red* tende a resultar em plantas altas e frágeis, indesejáveis em sistemas *indoor* (Sloper,

2020).

Além do efeito morfológico, o fitocromo também está envolvido na regulação da floração em plantas de dia curto, como a *Cannabis Sativa L.*. Nesse caso, a transição floral ocorre quando há conversão suficiente de Pfr de volta para Pr, o que exige longos períodos de escuridão ininterrupta (cerca de 12 horas). Em ambientes controlados, essa dinâmica permite manipular os ciclos de iluminação: alguns experimentos prolongam o período de luz diária (13–14 h) e utilizam breves exposições finais de *far-red* para acelerar a conversão Pfr → Pr. Assim, a planta “percebe” uma noite longa o bastante para florescer, ao mesmo tempo em que aproveita mais horas de fotossíntese para aumentar a produção de carboidratos, resultando em caules mais robustos e maior rendimento (Sloper, 2020).

Figura 6 – Técnica de cultivo utilizando FR em espécies floríferas



Fonte: Adaptado de Sloper, 2020.

## 2.1.5 Cannabis e Crisântemo

De acordo com a Lei nº 11.343/2006, que institui o Sistema Nacional de Políticas Públicas sobre Drogas (Sisnad), o cultivo de Cannabis sativa em território nacional é proibido, exceto nos casos em que a União autoriza especificamente o plantio para fins medicinais ou científicos, conforme previsto em seu Art. 2º, parágrafo único. Tais autorizações exigem solicitação formal, análise técnica e fiscalização, não sendo concedidas para projetos acadêmicos convencionais, o que inviabiliza a condução de experimentos com a espécie em ambientes universitários sem autorização federal. Em razão dessas restrições legais, tornou-se necessário selecionar uma espécie alternativa que permitisse a avaliação do sistema de iluminação desenvolvido sem violar a legislação brasileira, mantendo, ao mesmo tempo, relevância científica para estudos de fotoperíodo e qualidade espectral (Brasil, 2006).

Devido às restrições, optou-se por utilizar o crisântemo (*Chrysanthemum morifolium*) como planta-modelo para a validação da luminária desenvolvida. O crisântemo é uma espécie classicamente caracterizada como planta de dia curto, apresentando indução floral quando submetida a fotoperíodos reduzidos, o que o torna um dos modelos mais utilizados em estudos

de fotoperiodismo. Além disso, seu ciclo até a floração é relativamente curto, variando tipicamente entre 8 e 12 semanas, permitindo avaliar de forma eficiente os efeitos tanto do fotoperíodo quanto da qualidade espectral sobre o desenvolvimento vegetal. Estudos apontam que o crisântemo apresenta respostas bem definidas à interação entre luz vermelha (R) e vermelho-distante (FR), regulada pelo sistema de fitocromos, influenciando diretamente a transição entre crescimento vegetativo e floração. Essa sensibilidade à razão R:FR reforça a adequação da espécie para validar sistemas de iluminação que empregam diferentes composições espectrais. A planta também possui reconhecida importância medicinal, sendo utilizada devido às suas propriedades anti-inflamatórias e antioxidantes. Dessa forma, o uso do crisântemo garante viabilidade experimental, possibilita analisar de maneira clara a influência do espectro luminoso, da razão R:FR e do regime de luz sobre o crescimento e a floração e assegura relevância científica para a avaliação do sistema de iluminação proposto (Lancaster; Downes; Zieslin, 1996; Sharma *et al.*, 2023).

## 2.2 CONCEITOS E GRANDEZAS RELACIONADAS

O termo eficiência se aplica a razões entre grandezas com as mesmas unidades, podendo ser expressa como porcentagem. Para LEDs, isso corresponde à potência óptica de saída dividida pela potência elétrica de entrada (watt/watt ou %). Já eficácia é usada para razões entre grandezas com unidades diferentes. Na iluminação horticultural, refere-se à quantidade de fótons emitidos por segundo ( $\mu\text{mol/s}$ ) por watt de energia elétrica consumida ( $\mu\text{mol/J}$ ). Como 1 watt equivale a 1 joule por segundo, essa relação se simplifica para micromoles por joule (Kusuma; Pattison; Bugbee, 2020).

A relação entre a energia de um fóton e seu comprimento de onda é descrita pela equação de Planck–Einstein que estabelece que a energia é inversamente proporcional ao comprimento de onda, sendo fundamental para converter eficiência em eficácia e para calcular a máxima eficácia fotossintética possível em um determinado espectro de luz (Kusuma; Pattison; Bugbee, 2020). A quantização da radiação implica que a energia só pode assumir múltiplos inteiros de uma quantidade elementar, representada pelos fótons. Um fóton pode ser definido como um pacote de onda que transporta uma quantidade fixa de energia, expressa em Joules, determinada pela Equação 2.2, em que  $h$  é a constante de Planck — quantidade elementar de energia de um fóton — ( $6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ),  $c$  é a velocidade de propagação da radiação no vácuo ( $2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$ ) e  $\lambda$  é o comprimento de onda do fóton (m) (Ashdown, 2015; Silva, Indianara, 2015).

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.2)$$

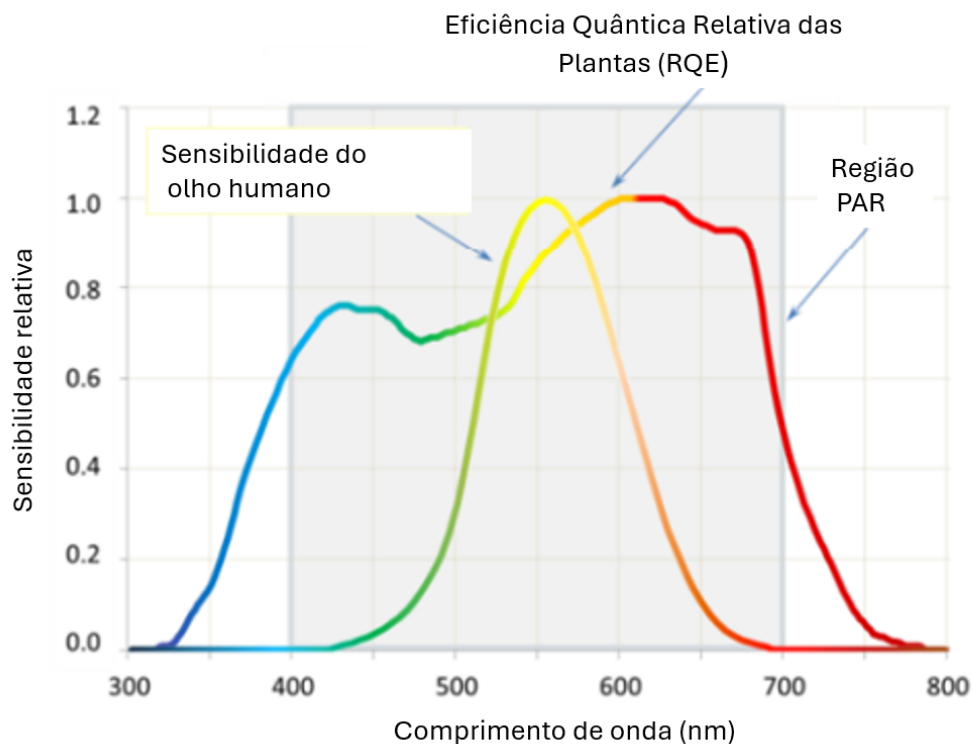
### 2.2.1 Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR)

A Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR), do inglês *Photosynthetically Active Radiation*, corresponde à faixa do espectro eletromagnético entre 400 e 700 nm, similar ao espectro de luz visível para seres humanos, como pode ser observado na Figura 7. Essa faixa do espectro é considerada a principal fonte de energia utilizada pelas plantas no processo de fotossíntese, pois nela os pigmentos presentes nos cloroplastos absorvem a luz de forma eficiente, possibilitando a produção de energia química.

Na mesma figura, é apresentada a Eficiência Quântica Relativa, ou *Relative Quantum Efficiency* (RQE), que indica a eficiência relativa com que cada comprimento de onda é aproveitado pelas plantas no processo fotossintético. Assim, enquanto a PAR define apenas a faixa espectral de interesse para a fotossíntese, a RQE mostra que os comprimentos de onda dentro dessa faixa não possuem a mesma eficiência de aproveitamento pela planta.

A intensidade e a distribuição da luz PAR são fatores determinantes não apenas para o crescimento e o desenvolvimento vegetal, mas também para a produtividade agrícola e para processos em escala ecológica, como o ciclo do carbono e o sequestro de CO<sub>2</sub>. A PAR, por representar uma faixa espectral, não possui unidade própria (Sloper, 2020; Liu *et al.*, 2025).

Figura 7 – Comparação entre a luz sensível ao olho humano e a região PAR.

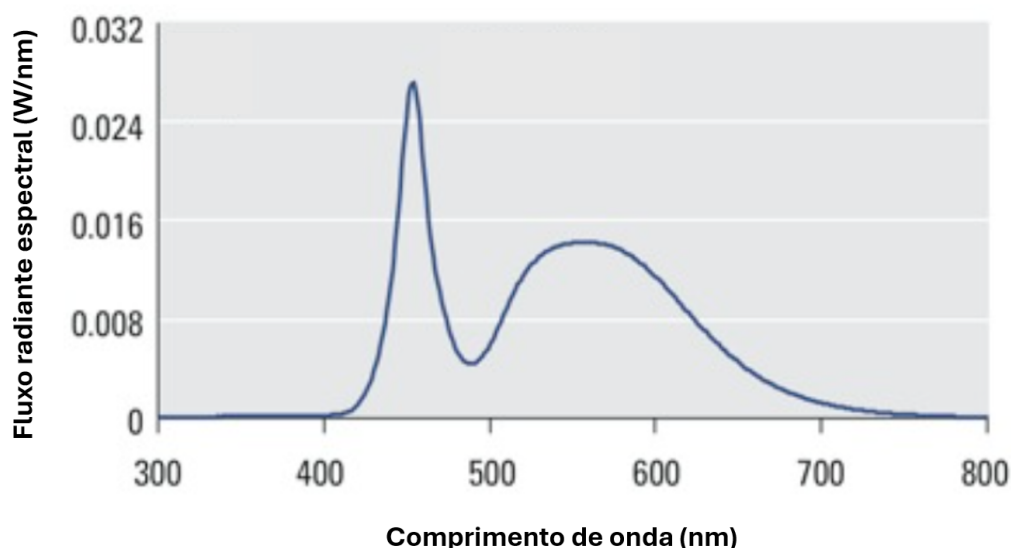


Fonte: Adaptado de Almeida et al., 2014.

### 2.2.2 Distribuição Espectral da Potência (SPD)

A Distribuição Espectral da Potência (SPD) do inglês *Spectral Power Distribution*, é uma função do comprimento de onda que descreve a quantidade de radiação eletromagnética emitida por uma fonte de luz ao longo de um espectro. De forma geral, o SPD corresponde a uma representação gráfica da potência radiante emitida em cada comprimento de onda ou faixa espectral, expressa idealmente em unidades de W/nm, pode-se observar um exemplo dessa representação gráfica na Figura 8. Na literatura, o termo também pode ser utilizado de maneira mais ampla para designar qualquer quantidade radiométrica ou fotométrica em função do comprimento de onda, desde que acompanhada das respectivas unidades. Em aplicações experimentais, o SPD é obtido por meio de espectrofotômetros, que coletam dados da emissão espectral e permitem a construção de gráficos representando a distribuição da potência radiante em diferentes comprimentos de onda (Chuang, 2023; Sloper, 2020).

Figura 8 – Representação gráfica do SPD no LED branco.



Fonte: Adaptado de Shang et al., 2014

### 2.2.3 Fluxo de fótons fotosintéticos (PPF)

Fluxo de fótons fotosintéticos (PPF) do inglês *Photosynthetic Photon Flux* refere-se à quantidade total de fótons dentro da faixa da radiação fotossinteticamente ativa (PAR, 400–700 nm) que uma fonte de luz emite por segundo. Essa grandeza é expressa em micromoles por segundo ( $\mu\text{mol s}^{-1}$ ) e representa o fluxo absoluto de fótons disponíveis para a fotossíntese, independentemente da direção em que são emitidos (Runckle *et al.*, 2021).

Por se tratar de uma medida global da emissão do sistema de iluminação, o PPF é um parâmetro frequentemente informado pelos fabricantes de luminárias hortícolas. A determinação desse valor geralmente é realizada por meio de uma esfera integradora, equipamento capaz

de capturar a radiação emitida em todas as direções e fornecer uma medida precisa da emissão total de fótons. Esse método garante padronização, sendo aplicável a diferentes tipos de fontes luminosas, e não apenas a sistemas de LEDs (Runckle *et al.*, 2021; Sloper, 2020).

Segundo Ashdown (2015), o PPF para cada comprimento de onda pode ser calculado pela Equação 2.3, onde  $\Phi(\lambda)$  ( $\text{W}\cdot\text{nm}^{-1}$ ) representa o fluxo radiante espectral em função do comprimento de onda — determinado através de ensaios fotométricos —  $\lambda_{\text{nm}}$  é o comprimento de onda,  $10^{-9}$  é a conversão de metros para nanômetros,  $10^{-6}$  converte mols em  $\mu\text{mol}$ ,  $N_A$  é a constante de Avogadro,  $h$  é a constante de Planck ( $6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ) e  $c$  é a velocidade de propagação da luz no vácuo ( $2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$ ).

Com isso, o PPF total pode ser obtido pela Equação 2.4, onde  $\Delta\lambda$  é o intervalo de comprimento de onda considerado. Valores típicos para  $\Delta\lambda$  variam de 1 a 5 nm, sendo 5 nm o mais comumente utilizado (Ashdown, 2015).

$$PPF/nm = 10^{-9} \cdot \frac{\lambda_{\text{nm}} \Phi(\lambda)}{(N_A \cdot 10^{-6}) hc} \quad (2.3)$$

$$PPF = 8.359 \times 10^{-3} \sum_{\lambda=400}^{700} \lambda_{\text{nm}} \Phi(\lambda) \Delta\lambda \quad (2.4)$$

#### 2.2.4 Densidade do fluxo de fótons fotosintéticos (PPFD)

A densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD) do inglês *Photosynthetic Photon Flux Density* é definida como o número de fótons no intervalo de 400 a 700 nm que incidem sobre uma superfície de um metro quadrado a cada segundo. Em outras palavras, o PPFD indica quanto do PPF é efetivamente entregue a uma área de cultivo ou ao dossel da planta, sendo expresso em micromoles por metro quadrado por segundo ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ). A determinação desse parâmetro é realizada com sensores quânticos, que medem a radiação fotossinteticamente ativa disponível por unidade de área (Pashiardis, 2021; Sloper, 2020).

#### 2.2.5 Fluxo de fótons ponderados por rendimento (YPF)

Como visto anteriormente neste trabalho, o PPF e o PPFD estão relacionados à quantidade de fótons na faixa de 400 a 700 nm. No entanto, a fotossíntese também é conduzida por fótons com comprimentos de onda abaixo de 400 nm e acima de 700 nm, e fótons de diferentes comprimentos de onda induzem quantidades desiguais de fotossíntese. Por essa razão, uma medição mais precisa da radiação fotossinteticamente ativa deve seguir a curva de Eficiência quântica relativa (RQE) do inglês *Relative Quantum Efficiency*, pode-se observar essa curva na Figura 7, desenvolvida originalmente por McCree, que pondera o valor fotossintético dos fótons entre 360 e 760 nm. Um sensor que responde de acordo com essa curva mede o Fluxo de Fótons Ponderados por Rendimento (YPF) do inglês *Yield Photon Flux*, em micromols por

metro quadrado por segundo ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), as mesmas unidades utilizadas atualmente para o PPFD (Barnes *et al.*, 1993).<sup>1</sup>

### 2.2.6 Índice diário de luz (DLI)

O Índice diário de luz (DLI) do inglês *Daily Light Integral* é uma medida que representa a quantidade total de luz fotossinteticamente ativa (PAR) que uma planta recebe ao longo de um dia. Essa grandeza é expressa em moles por metro quadrado por dia ( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ) e é considerada um dos parâmetros mais importantes para o crescimento vegetal, pois descreve a “dose diária” de fótons disponíveis para a fotossíntese. Para ambientes de cultivo *indoor*, o DLI pode ser estimado a partir do PPFD e do fotoperíodo, a partir da Equação 2.5 (Runckle *et al.*, 2021; Sloper, 2020).

$$\text{DLI} = \frac{\text{PPFD} \times 3600 \times h}{10^6} \quad (2.5)$$

em que PPFD é dado em  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $h$  é o número de horas de luz por dia— fotoperíodo — e o fator  $10^6$  converte micromols em mols. Essa abordagem permite aos cultivadores calcular a quantidade total de energia fotossinteticamente ativa fornecida diariamente às plantas, fornecendo uma referência fundamental para a otimização do crescimento, desenvolvimento e produtividade das plantas (Runckle *et al.*, 2021; Sloper, 2020).

## 2.3 DIODOS EMISSORES DE LUZ (LEDS)

Atualmente, os LEDs têm se mostrado promissores para aplicações em iluminação de plantas, tanto em ambientes controlados, como estufas, quanto em câmaras de crescimento para culturas *in vitro*. Em comparação com fontes de luz previamente utilizadas, os LEDs apresentam diversas vantagens, incluindo especificidade espectral, menor emissão de calor, maior durabilidade, consumo energético reduzido e, sobretudo, a possibilidade de manipular as características espectrais da luz emitida, permitindo ajustes finos de acordo com as necessidades fisiológicas das plantas (Cavallaro; Muleo, 2023).

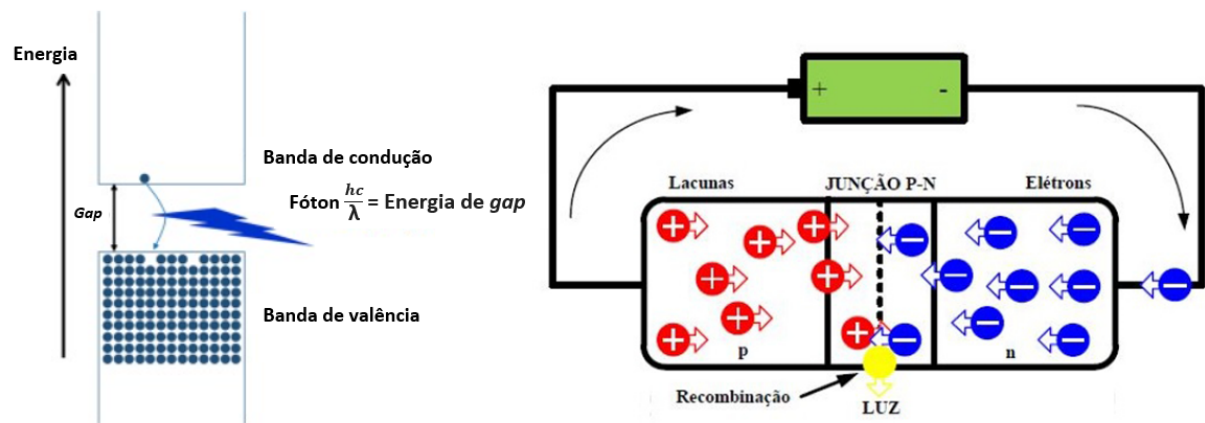
### 2.3.1 Princípio de funcionamento

Os LEDs funcionam com base nas propriedades dos semicondutores, materiais cuja capacidade de conduzir eletricidade pode ser controlada por meio de dopagem, ou seja, a introdução de átomos específicos chamados dopantes. Em um semicondutor puro, os elétrons estão presos em níveis de energia onde não conseguem se mover livremente. A dopagem cria duas regiões distintas: a tipo n, onde há excesso de elétrons que ocupam principalmente a banda

<sup>1</sup> Optou-se por utilizar o termo PPFD em vez de PPF ao apresentar a unidade, uma vez que a literatura mais antiga muitas vezes tratava ambos como equivalentes, mas atualmente o PPFD é a forma correta por incluir explicitamente a área de incidência ( $\text{m}^2$ ).

de condução, e a tipo p, onde há excesso de lacunas (espaços vazios de elétrons) associadas à banda de valência. Quando essas regiões se encontram, formam a chamada junção p-n, local onde elétrons da banda de condução da região n podem se recombinar com lacunas da banda de valência da região p. Essa recombinação libera energia na forma de fótons, produzindo luz. A cor da luz emitida depende da diferença de energia entre a banda de condução e a banda de valência do semiconductor, conhecida como *bandgap* medida em eV (Gayral, 2017). Pode-se observar o princípio de funcionamento dos LEDs na Figura 9.

Figura 9 – Princípio de funcionamento dos LEDs.



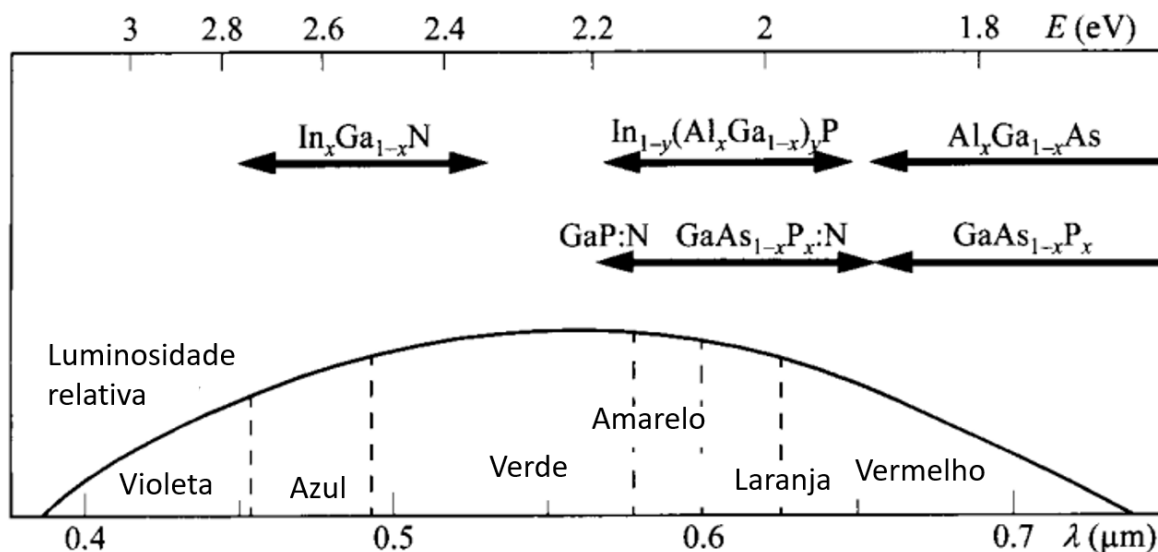
Fonte: Adaptado Gayral, 2017; Bender 2012.

Ademais, pode-se visualizar na Figura 10 os materiais semicondutores mais importantes para aplicações em LEDs. O espectro apresentado na imagem cobre a região visível ao olho humano e o infravermelho, indicando também o *bandgap* de cada semiconductor. Com exceção do GaAsP, todos esses semicondutores possuem *bandgap* direto, característica relevante para dispositivos eletroluminescentes, pois a recombinação radiativa ocorre como um processo de primeira ordem, resultando em eficiência geralmente maior do que em semicondutores de *bandgap* indireto, nos quais fônons — ondas de vibração que se propagam pelos átomos de um cristal e são importantes para o transporte de energia em processos como calor e som — estão envolvidos, podendo reduzir a eficiência da recombinação de elétrons e lacunas (Sze; Ng, 2007; Chandler, 2010).

### 2.3.2 Fatores importantes para a expectativa de vida do LED

A vida útil dos LEDs é influenciada por diversos fatores operacionais e ambientais que afetam a integridade física do dispositivo e sua capacidade de manter o desempenho lumínico ao longo do tempo. Entre os principais fatores destacam-se a temperatura de operação e a corrente elétrica aplicada, ambos diretamente relacionados à degradação dos materiais semicondutores, à eficiência da recombinação eletrônica e à manutenção do fluxo luminoso. A análise desses parâmetros é essencial para projetar sistemas de iluminação confiáveis e duradouros, garantindo tanto a estabilidade do desempenho quanto a segurança do dispositivo. Nas

Figura 10 – Principais semicondutores utilizados em LEDs.



Fonte: Adaptado de Sze; Ng, 2007.

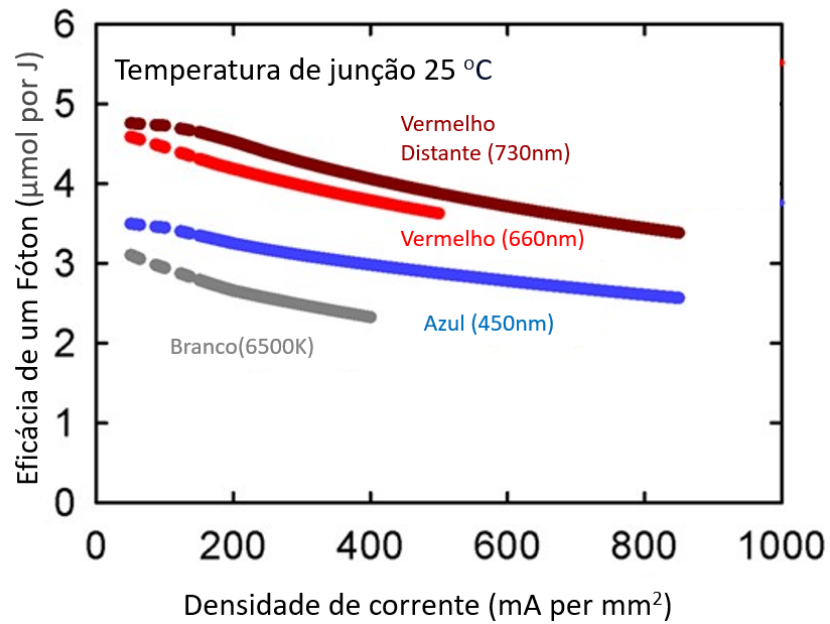
subseções a seguir, são detalhados os efeitos da temperatura e da corrente sobre a expectativa de vida dos LEDs, com base em estudos recentes sobre confiabilidade e degradação luminosa (Singh; Tan, 2016; Kusuma; Pattison; Bugbee, 2020).

### 2.3.2.1 Corrente

A eficácia dos LEDs tende a diminuir conforme aumenta a densidade de corrente aplicada ao dispositivo, fenômeno conhecido como *current droop*. Esse efeito representa a redução da eficiência radiativa do LED à medida que a corrente de acionamento é elevada. No caso de LEDs azuis, o *current droop* ocorre principalmente devido à recombinação Auger (processo não radiativo que ocorre em semicondutores quando um elétron e uma lacuna se recombinam, mas a energia liberada não é emitida como um fóton (luz), e sim transferida para outro elétron ou lacuna dentro do material. Esse portador adicional absorve a energia e é excitado para um nível de energia mais alto, dissipando-a posteriormente em forma de calor). Já em LEDs brancos — que utilizam um LED azul combinado com uma camada de fósforo —, a queda de eficiência está relacionada tanto à recombinação Auger no LED azul quanto à redução da eficiência de conversão do fósforo em altas densidades de fluxo óptico. Para LEDs vermelhos e infravermelhos, o fenômeno é causado pelo vazamento de portadores devido à baixa capacidade de confinamento de elétrons nas regiões ativas. De modo geral, a redução da corrente de acionamento aumenta a eficácia do LED (Kusuma; Pattison; Bugbee, 2020; Espenlaub *et al.*, 2019). Pode-se observar na Figura 11 a relação entre densidade de corrente e eficácia.

Ademais, ao operar o LED com uma corrente inferior ao valor nominal máximo indicado pelo fabricante, é possível aumentar a durabilidade do dispositivo, contribuindo para uma maior vida útil e estabilidade ao longo do tempo (Almeida, 2014). Esse efeito pode ser

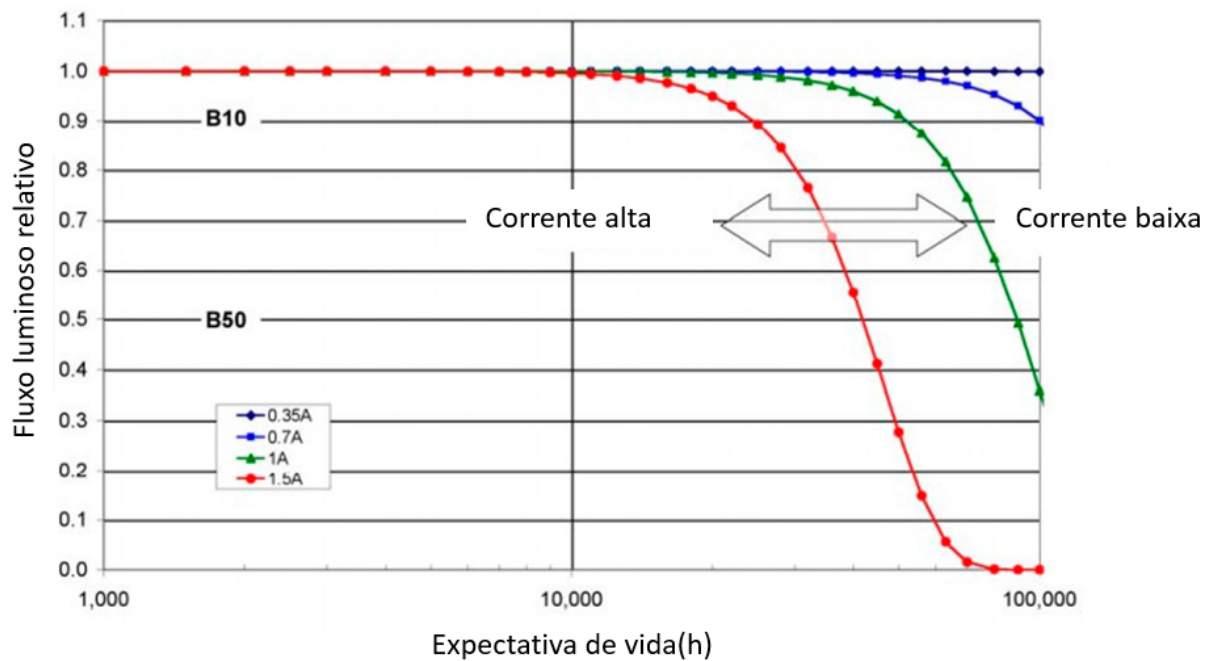
Figura 11 – Eficácia X Densidade de corrente.



Fonte: Adaptado de Kusuma; Pattison; Bugbee, 2020.

observado na Figura 12.

Figura 12 – Corrente x vida útil - LED modelo Luxeon K2.

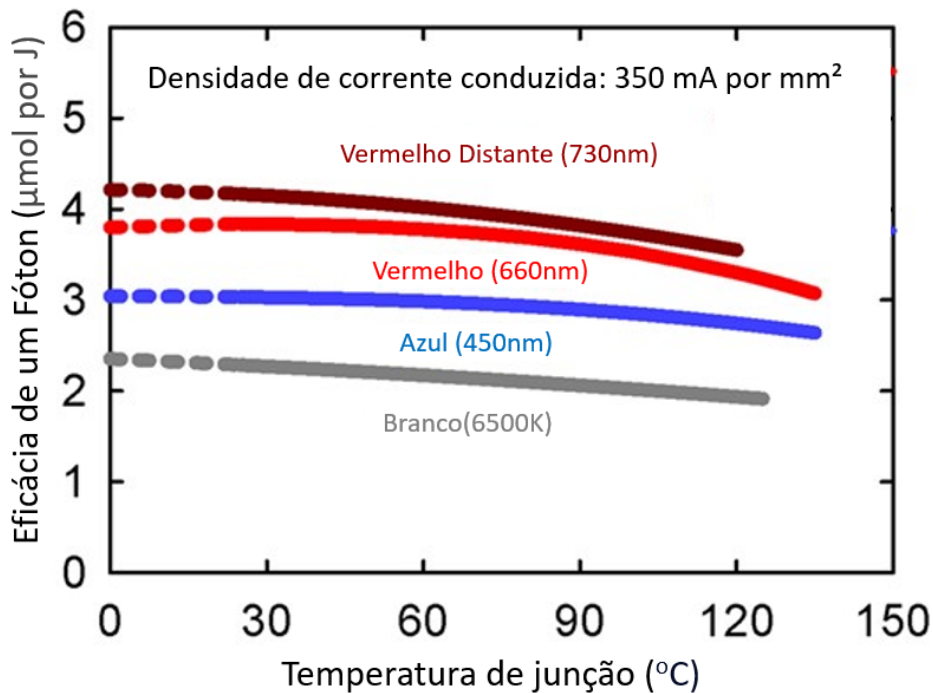


Fonte: Adaptado de Almeida, 2014.

### 2.3.2.2 Temperatura

A temperatura da junção corresponde à temperatura de operação diretamente no diodo. Para a avaliação da eficácia de LEDs, normalmente são considerados dois padrões de referência: 25°C e 85°C. Observa-se na Figura 13 que a eficácia diminui cerca de 10% quando a temperatura aumenta de 25°C para 85°C, fenômeno conhecido como *thermal droop* (queda térmica de desempenho). Esse efeito tende a ser mais acentuado em LEDs vermelhos quando comparados aos LEDs azuis (Kusuma; Pattison; Bugbee, 2020).

Figura 13 – Eficácia x Temperatura de junção



Fonte: Adaptado de Kusuma; Pattison; Bugbee, 2020.

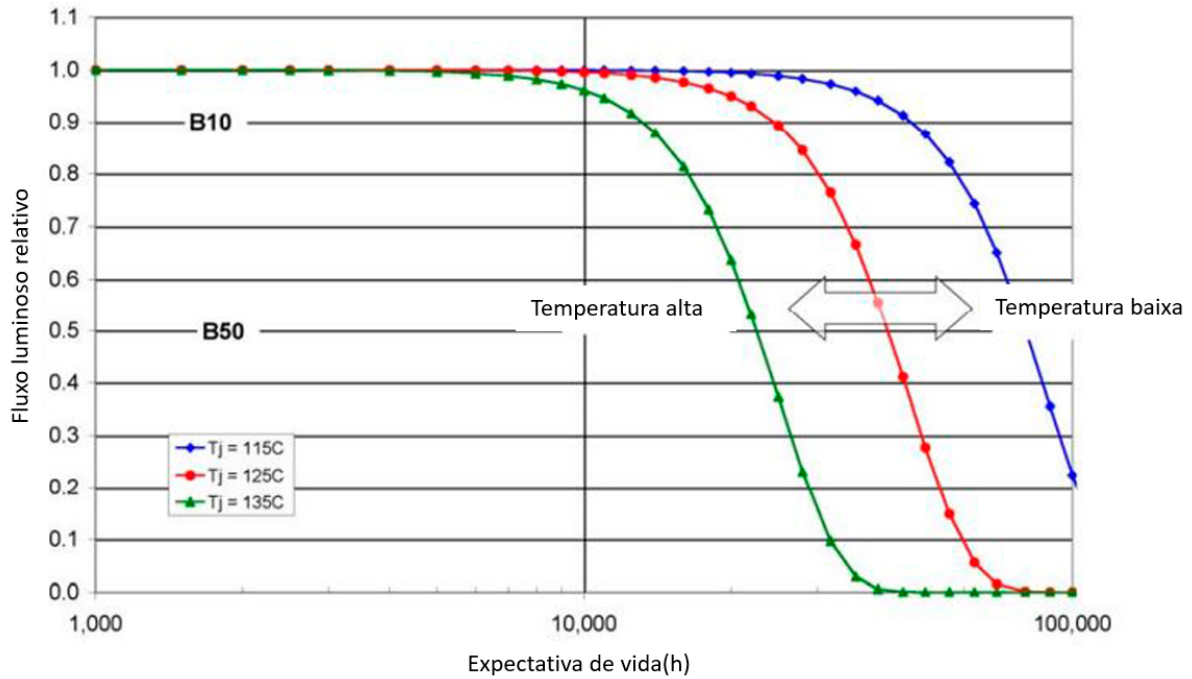
Além disso, a temperatura tem papel determinante na durabilidade dos LEDs, pois o aumento térmico acelera a degradação dos materiais que compõem o dispositivo, como o chip emissor, o substrato e o encapsulante. Quando submetido a condições de operação mais quentes, o LED tende a sofrer envelhecimento prematuro, resultando em perda gradual de desempenho e redução de sua vida útil. Dessa forma, o controle térmico torna-se fundamental para preservar a estabilidade e garantir o funcionamento confiável do dispositivo ao longo do tempo (Singh; Tan, 2016).

Para fins de cálculo, a equação 2.6 demonstra que, a temperatura de junção ( $T_j$ ), expressa em graus Celsius (°C), pode ser estimada a partir da resistência térmica do LED ( $R_{th,LED}$ ), em °C/W, da potência térmica dissipada ( $P_{thermal}$ ), em watts (W), e da temperatura local da placa de circuito impresso ( $T_{PCB}$ ), também em °C. Essa relação permite avaliar o aquecimento interno do dispositivo, sendo fundamental para prever seu desempenho e a degradação ao longo do tempo (Weber, 2015).

$$T_j = R_{th,LED} \times P_{thermal} + T_{PCB} \quad (2.6)$$

Por fim, pode-se observar na Figura 14 a relação entre a expectativa de vida e a temperatura de junção para o LED Luxeon K2 da Lumileds.

Figura 14 – Temperatura de junção x Expectativa de vida



Fonte: Adaptado de Almeida, 2014.

### 2.3.3 Modelo elétrico linear dos LEDs

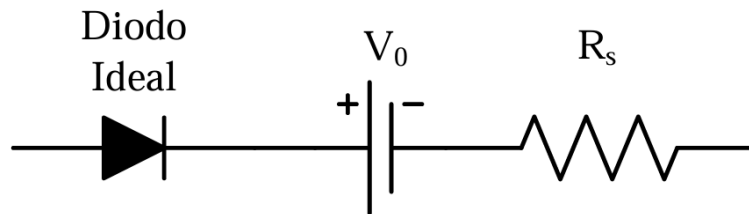
Os LEDs consistem em junções p-n que permitem a condução de corrente em apenas uma direção. Para que o LED entre em operação, a tensão aplicada entre o ânodo e o cátodo deve ser igual ou superior à sua tensão de corte, pois tensões inferiores não promovem passagem significativa de corrente. O valor da tensão de corte depende do tipo de LED, do material semicondutor e da energia de gap associada ao dispositivo. Comparativamente aos diodos convencionais, a curva  $V_{LED} \times I_{LED}$  dos LEDs apresenta diferenças marcantes devido à presença de resistências parasitas, que geram perdas ôhmicas à medida que a corrente atravessa a junção (Sá Júnior, 2010).

No modelo elétrico do LED, a resistência série  $R_S$  é o parâmetro mais relevante, pois determina a inclinação da curva para tensões acima da tensão de corte e influencia diretamente a densidade de potência em LEDs de alta potência (Vieira, 2009). Para um ponto de operação fixo, considerando temperatura constante e corrente próxima à nominal, o comportamento elétrico do LED pode ser aproximado pela seguinte equação:

$$V_{LED} = V_0 + R_S \cdot I_{LED} \quad (2.7)$$

onde  $V_0$  representa a fonte de tensão interna do modelo do LED (algumas vezes denominada tensão de joelho),  $R_S$  a resistência série e  $I_{LED}$  a corrente que percorre o dispositivo. A partir da análise da equação 2.7, o modelo elétrico do LED pode ser representado por um diodo ideal em série com uma fonte de tensão constante  $V_0$  e uma resistência  $R_S$ . Essa configuração permite descrever com precisão o comportamento do LED em seu ponto de operação (Dias, 2012). Pode-se observar o modelo elétrico na Figura 15.

Figura 15 – Modelo elétrico do LED



Fonte: Adaptado de Dias, 2012.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais, componentes e procedimentos que foram utilizados no desenvolvimento de uma luminária *grow* destinada a aplicações em estudos de plantas medicinais. O projeto tem como objetivo principal a implementação de um sistema de iluminação com controle de espectro, permitindo a variação das faixas de luz emitidas conforme a necessidade da aplicação. Para isso, são descritos os principais elementos eletrônicos empregados, como os módulos de LEDs, o *driver* de corrente, o circuito de controle e a estrutura mecânica do conjunto, além da metodologia adotada para montagem, testes e validação do protótipo. A descrição detalhada dessas etapas visa garantir a reprodutibilidade do projeto e oferecer subsídios para futuras melhorias em sistemas de iluminação de cultivo controlado.

### 3.1 MATERIAIS

Para a construção do protótipo, foram empregados os materiais listados a seguir. Esses itens foram selecionados com base em suas características técnicas e na adequação às exigências do projeto.

#### 3.1.1 LEDs

A definição dos LEDs envolve a análise das características espectrais correspondentes a cada fase, juntamente com seus parâmetros elétricos. A seleção dos modelos comerciais é guiada pela potência estipulada para a luminária, assegurando compatibilidade e eficiência no funcionamento.

##### 3.1.1.1 Potência

A potência definida para o projeto constitui o principal parâmetro que orienta tanto a construção do módulo de LEDs quanto a seleção do driver responsável pela sua alimentação. No mercado, os módulos mais comuns são os de 65 W e 120 W, amplamente utilizados por apresentarem uma boa relação entre custo e desempenho. Esses modelos demandam menor quantidade de LEDs e, em alguns casos, dispensam o uso de dissipadores térmicos, o que contribui para a redução do custo total do sistema. Considerando o equilíbrio entre eficiência luminosa, consumo energético e viabilidade de implementação, optou-se pela utilização de um módulo de 120 W, potência adequada para suprir de forma eficiente o cultivo de uma planta, tanto na fase vegetativa quanto na fase de floração. Na Figura 16, podem-se observar alguns modelos comerciais de referência, um com dissipador térmico e um sem.

Figura 16 – Modelos comerciais de luminárias *grow* de 120 W



Fonte: Adaptado de LEDs Indoor, 2025 e Sunny light, 2025.

### 3.1.1.2 Escolha dos LEDs

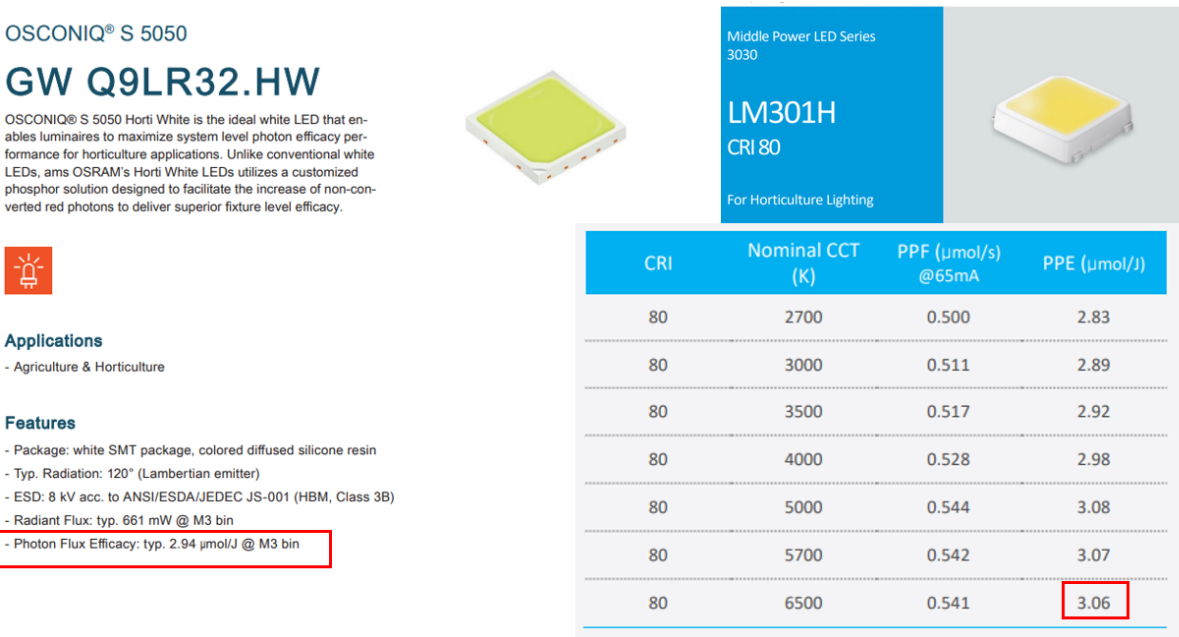
Os LEDs representam o componente mais importante de todo o projeto, sendo determinantes para a eficiência e o desempenho final da luminária. A escolha de dispositivos de alta qualidade é essencial para garantir a efetividade do protótipo, assegurando níveis adequados de intensidade e distribuição espectral da luz. Os LEDs selecionados foram escolhidos de modo a atender às necessidades fotossintéticas da planta tanto na fase vegetativa quanto na fase de floração. Foram utilizados LEDs das seguintes faixas espectrais: branco frio (6500K), branco quente (3000K), vermelho profundo (660 nm), azul (450 nm) e vermelho distante (730 nm).

No mercado, os LEDs da linha LM da Samsung se destacam por sua elevada eficiência e confiabilidade, sendo amplamente empregados em luminárias comerciais voltadas ao cultivo de plantas. A Figura 16 ilustra exemplos de luminárias comerciais que utilizam esses modelos, evidenciando sua aplicação prática. Dessa forma, optou-se pela utilização dos LEDs brancos da linha Samsung, visando desenvolver um projeto eficiente, durável e de alta qualidade. Na Figura 17, é apresentada uma comparação de eficácia entre os LEDs da Samsung e os da Osram, demonstrando o desempenho superior dos primeiros. Para os demais comprimentos de onda, não há evidências conclusivas de que os LEDs da linha Samsung apresentem desempenho superior em relação a outras marcas disponíveis no mercado. Além disso, o custo elevado desses componentes torna sua adoção menos viável para o escopo deste projeto. Dessa forma, optou-se pela utilização de LEDs da marca Everlight, os quais já foram empregados em projetos anteriores realizados pelo autor, demonstrando desempenho satisfatório e resultados consistentes. Na Tabela 3, são apresentados os modelos selecionados para cada faixa espectral.

### 3.1.2 Fonte de alimentação

A alimentação da luminária foi realizada por meio de uma fonte de corrente constante de 1050 mA, fabricada pela Intral S.A. Esse componente foi escolhido por atender de forma eficiente aos requisitos elétricos do projeto, garantindo estabilidade na operação dos LEDs. O

Figura 17 – Comparação entre os modelos de LEDs OSRAM e Samsung aplicados na horticultura



Fonte: Adaptado de OSRAM, 2025 e Samsung, 2025.

Tabela 3 – LEDs escolhidos para o projeto

| Categoria               | Modelo                     | Fabricante | Part Number                | Cor / Comprimento de onda |
|-------------------------|----------------------------|------------|----------------------------|---------------------------|
| LEDs Brancos            | LM301H WARM 3000K 3030     | Samsung    | SPMWH32AMH5XAV5SK          | Branco quente – 3000K     |
|                         | LM301H COOL 6500K 3030     | Samsung    | SPMWH32AMH5XAP5SL          | Branco frio – 6500K       |
| LEDs Azuis              | Shwo (F) 1W Series         | Everlight  | ELSW-R51L1-0EPNM-CB4B6     | Royal blue – 445–460nm    |
| LEDs Vermelhos          | HPND3535CZ0112 (EU) Series | Everlight  | HPND3535CZ0112 (EU) Series | Deep Red – 660–665nm      |
| LEDs Vermelhos distante | Shwo 1W Series             | Everlight  | *ELSW-Q91F1-0LPNM-AF3F8    | Far Red – 715–730nm       |

uso de fontes de corrente constante é o mais indicado em aplicações com diodos emissores de luz, pois os LEDs são dispositivos controlados por corrente, e pequenas variações nesse parâmetro podem resultar em alterações significativas na potência dissipada e, consequentemente, na temperatura de junção. Diferentemente das fontes de tensão constante, que podem causar sobrecorrente e reduzir a vida útil dos dispositivos, as fontes de corrente constante mantêm o fluxo de corrente estável, prevenindo sobrecarga, variações térmicas abruptas e degradação prematura do LED. Dessa forma, o uso desse tipo de fonte contribui diretamente para o aumento da confiabilidade e da durabilidade da luminária (Arrow Electronics, 2024). Na Figura 18, apresentam-se as especificações técnicas dessa fonte de alimentação.

### 3.2 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

Para o desenvolvimento do sistema, foram adotados procedimentos organizados que orientaram a construção e a integração dos componentes do projeto. Dessa forma, cada etapa foi conduzida de modo a atender aos requisitos definidos para o funcionamento da luminária.

Figura 18 – Especificações técnicas da fonte de alimentação

| DRIVER<br>LINEAR IP67 PROG |                      |                              |                         |                             |                         |                                |                   |         |                |        |        |        |
|----------------------------|----------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------|---------|----------------|--------|--------|--------|
| Código                     | Modelo               | Potência Máxima de Saída (W) | Corrente de Saída (Adc) | Faixa de Tensão Saída (Vdc) | Tensão de Entrada (Vac) | Corrente Máxima de Entrada (A) | Fator de Potência | THD (%) | Eficiência (%) | A (mm) | B (mm) | Figura |
| 04014                      | L4014-CIP4U1050/150P | 150                          | 700 - 1050              | 107 - 214                   | 90 - 305                | 1,28<br>0,74                   | 0,95              | 10      | 93             | 173    | 158    | 1      |

DRIVER DE CORRENTE  
DIMERIZÁVEL PROGRAMÁVEL



**CARACTERÍSTICAS**

- Corrente de saída ajustável por programação, via software<sup>(\*)</sup>, e dimerizável pelo uso de uma fonte de tensão contínua de controle 0 a 10Vdc ou PWM;
- Alta eficiência;
- Multitensão de 90 a 305Vac;
- Aplicação interna/externa;
- Protegido contra curto-circuito, circuito aberto, sobrecarga na saída e sub-tensão;
- Protegido contra sobre temperatura;
- Temperatura ambiente de instalação: -40°C a + 55°C;
- Saída isolada da entrada;
- Proteção contra surto de tensão: 5kV (F-N) e 10kV (FN-T);
- Expectativa de vida de 100.000 horas;
- Grau de proteção contra intempéries: IP67;
- Frequência de alimentação: 50/60 Hz;
- Atende às marcações CE/ENEC/CB;

Fonte: Adaptado de Intral S.A, 2025.

3.2.1 Módulo de LEDs

3.2.1.1 Vega e Flora

O módulo de LEDs foi desenvolvido para atender de forma diferenciada as duas principais fases de desenvolvimento da planta: vegetativa (“Vega”) e de floração (“flora”). Nas Figuras 19 e 20 , é possível observar a *Cannabis Sativa L.* e o Crisântemo, respectivamente, nesses dois estágios distintos. Conforme discutido anteriormente neste trabalho, diferentes espectros luminosos influenciam características fisiológicas específicas das plantas. Em ambas as fases, a predominância foi de LEDs brancos, correspondendo a aproximadamente 80% da potência total da luminária — distribuída igualmente entre branco frio (6500 K) e branco quente (3000K) — com o objetivo de garantir um espectro amplo e equilibrado ao longo de todo o ciclo de cultivo.

A composição espectral da luminária foi definida em aproximadamente 10% de LEDs azuis, 10% de LEDs vermelhos e 80% de LEDs brancos, garantindo um espectro equilibrado capaz de atender tanto à fase vegetativa quanto à fase de floração da planta. Durante a fase vegetativa, a presença de comprimentos de onda na faixa do azul favorece a formação de caules mais compactos e densos, reduzindo o alongamento vertical e promovendo um desenvolvimento foliar robusto. Esse comportamento foi confirmado por (Pashiardis, 2021), que observou que diferentes intensidades e espectros luminosos influenciam diretamente a biomassa, a área foliar e a arquitetura da *Cannabis sativa L.* durante o crescimento vegetativo.

Na fase de floração, a proporção de luz vermelha presente na mistura espectral desempenha papel essencial no desenvolvimento floral e no aumento da taxa fotossintética. Holweg et al. (2024) demonstraram que a combinação de luz vermelha e branca otimiza tanto o cres-

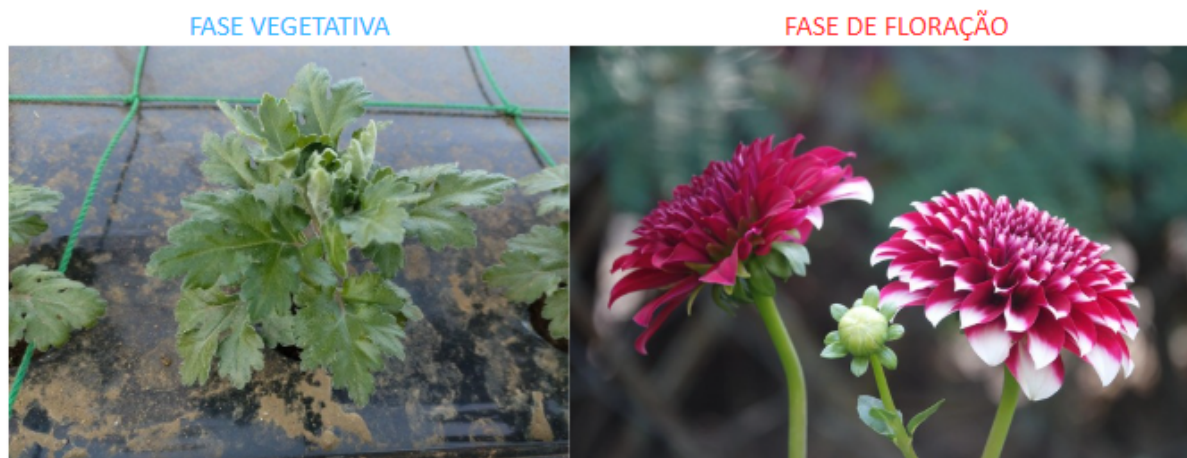
cimento quanto a produção de metabólitos secundários, essenciais para a qualidade final das flores. De forma semelhante, Jenkins et al. (2021) observaram que espectros ricos em vermelho, quando aplicados durante os estágios finais de floração, potencializam a densidade e o tamanho das flores, além de melhorar a eficiência fotossintética. Complementarmente, foram empregados LEDs de vermelho distante (em torno de 730 nm) por um curto intervalo de tempo durante a transição entre o período de luz e o período de escuro. Como discutido anteriormente, essa estratégia visa favorecer a conversão dos fitocromos ativos (Pfr) para a forma inativa (Pr), simulando de forma mais natural o pôr do sol e auxiliando a planta a reconhecer o início do período noturno, o que contribui para a regulação adequada do ciclo de floração.

Figura 19 – Fases da *Cannabis Sativa L.*



Fonte: Adaptado de Kaya Mind, 2025.

Figura 20 – Fases do crisântemo



Fonte: Adaptado de Casa cor, 2026.

### 3.2.1.2 Arranjo dos LEDs

Considerando a utilização de uma fonte de alimentação de corrente constante de 1.050 mA e tendo como limitante a corrente máxima dos LEDs brancos da Samsung, de 200 mA, a luminária foi projetada com seis *strings* de LEDs em paralelo. Para garantir equipotencialidade entre todas as *strings*, a mesma quantidade de LEDs brancos, azuis e vermelhos foram utilizada em cada *string*. Na Tabela 4, apresenta-se a quantidade de LEDs em série por *string*, buscando manter a potência total de 120 W.

Tabela 4 – Características elétricas e ópticas dos LEDs utilizados

| Modelo                           | Comprimento de onda | Corrente (A) | Tensão (V) | Potência (W) | Qtd. LEDs | Pot. total (W) | LEDs por string | Tensão por string (V) |
|----------------------------------|---------------------|--------------|------------|--------------|-----------|----------------|-----------------|-----------------------|
| LEDs Brancos                     |                     |              |            |              |           |                |                 |                       |
| LED LM301H WARM WHT 3000K 3030   | 3000K               | 0,175        | 2,85       | 0,49875      | 96        | 47,88          | 32              | 91,2                  |
| LED LM301H COOL WHITE 6500K 3030 | 6500K               | 0,175        | 2,85       | 0,49875      | 96        | 47,88          |                 |                       |
| LEDs Azuis                       |                     |              |            |              |           |                |                 |                       |
| Shwo [Shuo (F)] 1W Series        | 445–460nm           | 0,175        | 3,0        | 0,525        | 24        | 12,6           | 5               | 12                    |
| LEDs Vermelhos                   |                     |              |            |              |           |                |                 |                       |
| HPND3535CZ0112 (EU) Series       | 660–665nm           | 0,175        | 1,9        | 0,3325       | 42        | 13,965         | 7               | 13,3                  |
| LEDs Vermelhos distantes         |                     |              |            |              |           |                |                 |                       |
| Shwo [Shuo] 1W Series            | 715-730nm           | 0,4          | 2,22       | 0,888        | 50        | 44,4           | 50              | 111                   |

Com base nas especificações definidas, a luminária foi projetada para operar com seis *strings* de LEDs, cada uma apresentando uma tensão total aproximada de 116,5 V. Dessa forma, o conjunto atinge uma potência total de 122,3 W, correspondendo a um total de 258 LEDs distribuídos de forma equilibrada entre as *strings*. Durante a fase vegetativa, o módulo funcionou com os LEDs brancos, azuis e vermelhos acionados conforme o fotoperíodo definido para o cultivo. Já na fase de floração, a estratégia de acionamento foi ajustada: ao término do ciclo de luz diário, os LEDs brancos, azuis e vermelhos serão desligados, e os LEDs vermelho distante serão acionados isoladamente por um curto intervalo de tempo. Essa configuração utiliza o mesmo driver de corrente constante, porém com controle ajustado da corrente de saída, a fim de evitar sobrecorrente nos LEDs vermelho distante — esse controle será detalhado ao longo deste trabalho. Nessa condição, a luminária apresentará tensão de operação aproximada de 111 V e corrente de 400 mA, configurada para alimentar apenas uma string, totalizando uma potência de 44,4 W.

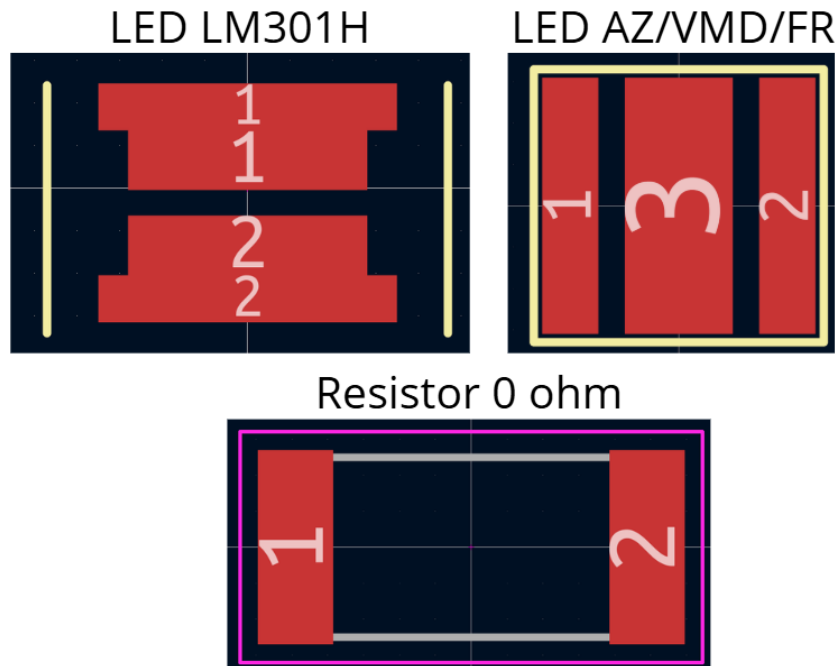
### 3.2.1.3 Desenvolvimento da placa de circuito impresso

Após a definição do arranjo elétrico dos LEDs e das características de operação da luminária, foi iniciado o desenvolvimento da placa de circuito impresso utilizando o software *KiCad*. Inicialmente, realizou-se a elaboração do esquemático elétrico do sistema, definindo-se as conexões entre os LEDs e os pontos de alimentação dos módulos.

O esquemático foi desenvolvido considerando a utilização de seis *strings* em paralelo para o módulo principal, cada uma composta por 44 LEDs associados entre LEDs brancos, azuis e vermelhos, além de uma *string* dedicada ao módulo de LEDs vermelho distante (*far*



Figura 22 – *Footprint* desenvolvido no *software KiCad*



Fonte: Autor, 2026.

fator importante devido à elevada densidade de potência presente no módulo.

A PCB foi desenvolvida utilizando substrato de alumínio com condutividade térmica de 2 W/mK, visando melhorar a transferência de calor gerado pelos LEDs para a estrutura metálica da luminária, reduzindo a temperatura de operação dos componentes e contribuindo para o aumento da vida útil do sistema. A utilização da placa de alumínio mostra-se especialmente importante devido à elevada potência do módulo e à grande quantidade de LEDs distribuídos em uma única estrutura.

O módulo foi projetado em camada simples (*single layer*), buscando reduzir os custos de fabricação e simplificar o processo produtivo da placa. Para possibilitar o roteamento completo do circuito utilizando apenas uma camada de cobre, foram empregados jumpers implementados através de resistores de 0 *ohm*, permitindo cruzamentos elétricos sem a necessidade de vias ou múltiplas camadas.

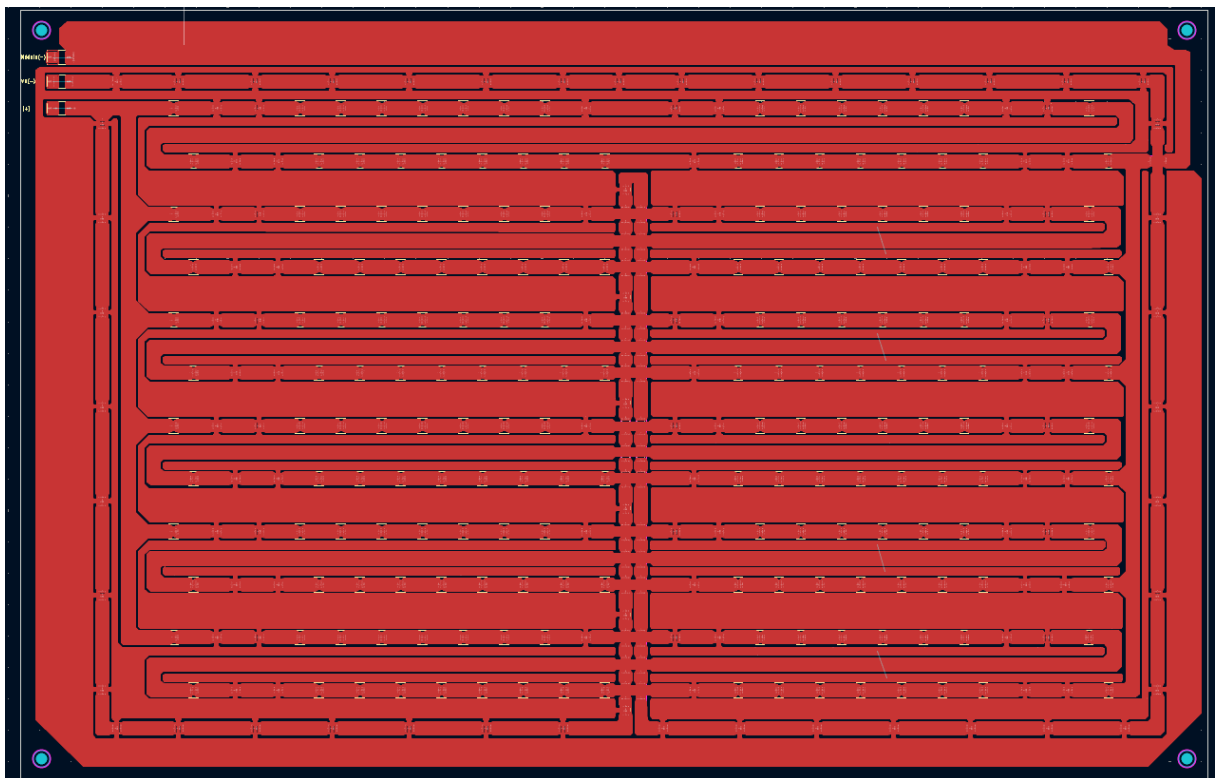
As dimensões finais da PCB foram definidas em 378 mm de largura por 244,6 mm de altura, buscando compatibilidade com a estrutura mecânica da luminária e distribuição uniforme dos LEDs ao longo da superfície do módulo. O acabamento superficial escolhido para a placa foi baseado em verniz protetivo aplicado sobre a camada de cobre, principalmente devido ao menor custo de fabricação em comparação com acabamentos metálicos, fator relevante durante a etapa de prototipagem e validação do projeto.

Durante o desenvolvimento da PCB, também foram considerados critérios relacionados

ao espaçamento elétrico entre trilhas e componentes, especialmente devido à elevada tensão de operação do sistema. Para isso, foram utilizados os recursos de verificação de regras de projeto (*Design Rule Check – DRC*) disponíveis no software KiCad, permitindo identificar erros de conexão, violações de isolamento elétrico (*clearance*) e possíveis falhas no roteamento da placa.

Após a finalização das verificações e correções necessárias, foram gerados os arquivos de fabricação no formato *Gerber*, juntamente com os arquivos de furação, possibilitando a fabricação dos protótipos da placa de circuito impresso. O resultado final do projeto da PCB pode ser observado nas Figuras 23 e 24.

Figura 23 – Placa de circuito impresso com todas as camadas



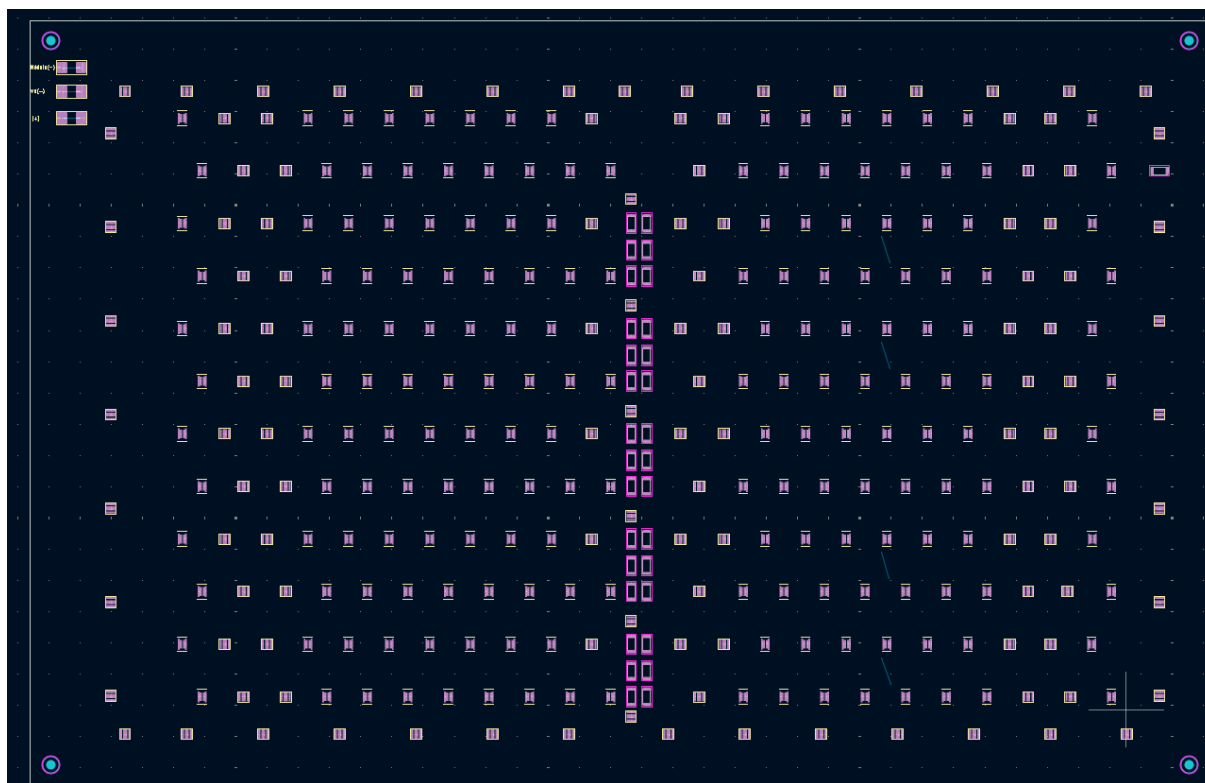
Fonte: Autor, 2026.

#### 3.2.1.4 Montagem da placa

Após a fabricação da placa de circuito impresso, iniciou-se o processo de montagem dos componentes eletrônicos do módulo de LEDs. A montagem foi realizada manualmente, devido à natureza prototípica do projeto e à necessidade de verificação individual dos componentes durante o posicionamento na PCB.

Inicialmente, foi realizada a aplicação da pasta de solda sobre os *pads* da placa, utilizando-se estêncil para deposição uniforme do material nas áreas de soldagem dos componentes SMD. Após essa etapa, os LEDs foram posicionados manualmente um a um com o auxílio de pinça de precisão, verificando-se continuamente a polaridade e o posicionamento correto de cada componente, fator essencial para garantir o funcionamento adequado das *strings* de LEDs.

Figura 24 – Placa com camada de cobre oculto



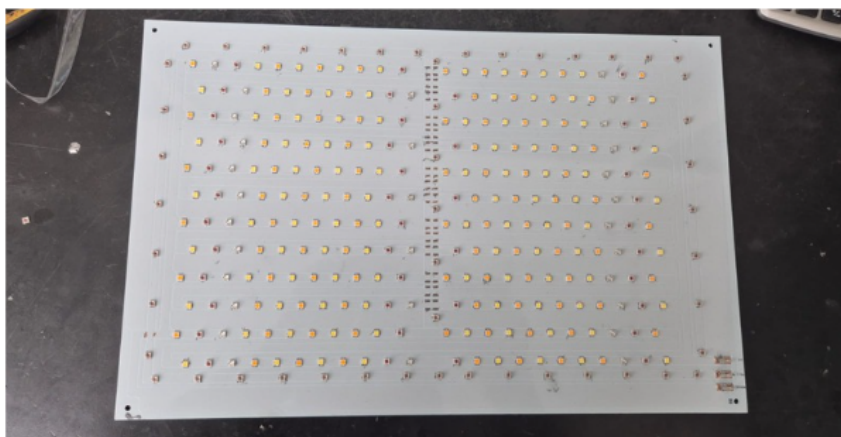
Fonte: Autor, 2026.

Devido à elevada quantidade de componentes presentes no módulo e à utilização de diferentes tipos de LEDs, o processo de montagem exigiu atenção especial quanto à organização e identificação dos componentes durante a inserção na PCB. Além disso, buscou-se manter alinhamento uniforme entre os LEDs, contribuindo tanto para a confiabilidade elétrica quanto para o acabamento visual do módulo.

Após o posicionamento dos componentes, a placa foi submetida ao processo de soldagem por refusão (*reflow*) utilizando forno contínuo. Durante essa etapa, a pasta de solda foi aquecida até a temperatura de fusão, promovendo simultaneamente a fixação mecânica e a conexão elétrica dos LEDs à placa de circuito impresso. A curva de temperatura utilizada no processo seguiu as recomendações especificadas pelo fabricante da pasta de solda, visando garantir a correta formação das juntas de solda e evitar danos térmicos aos componentes.

Após a etapa de soldagem, foram realizadas inspeções visuais para identificação de possíveis falhas, como desalinhamento de componentes, ausência de solda, curto-circuitos ou defeitos nas conexões elétricas. Na Figura 25 pode-se observar a PCB antes da montagem dos LEDs e, posteriormente, a placa finalizada após o processo de soldagem dos componentes.

Figura 25 – Placa antes da montagem e posteriormente a montagem finalizada



**PCI com os LEDs Inseridos**



**PCI antes da inserção dos LEDs**

Fonte: Autor, 2026.

### 3.2.2 Controle da luminária

O ESP32 é um microcontrolador desenvolvido pela Espressif Systems, amplamente utilizado em aplicações de automação, controle embarcado e sistemas com conectividade sem fio. O dispositivo possui arquitetura de 32 bits, dois núcleos de processamento Xtensa® LX6, frequência de operação de até 240 MHz e memória RAM interna de 520 kB. Além disso, disponibiliza múltiplos pinos de entrada e saída digitais, possibilitando o acionamento dos relés responsáveis pela comutação dos módulos luminosos, pelo controle das lâmpadas comparativas e pela atuação na entrada de dimerização do driver.

Outro fator relevante para sua escolha é a presença de conectividade Wi-Fi integrada, recurso que permitiu o desenvolvimento de uma interface web para o controle do sistema. Por meio dessa interface, o usuário pode selecionar o modo de operação da luminária e acompanhar o estado atual do ciclo de iluminação. Assim, o ESP32 se mostrou adequado para a aplicação proposta, pois reúne capacidade de processamento, número suficiente de saídas digitais, comunicação sem fio e baixo custo, características importantes para o gerenciamento automatizado dos ciclos de iluminação. O microcontrolador utilizado pode ser observado na Figura 26.

O ESP32 foi programado para realizar essa sequência de forma cíclica e autônoma, repetindo o fotoperíodo de acordo com o modo configurado e permitindo, por meio da interface

Figura 26 – ESP-WROOM-32



Fonte: Adaptado de AF eletrônica, 2025

web, a transição entre as fases de cultivo. Esse controle automatizado garante maior precisão no manejo da iluminação, reduz a necessidade de intervenção manual e aumenta a eficiência geral do sistema de cultivo.

#### 3.2.2.1 Fluxograma do sistema de controle

O fluxograma apresentado na Figura 27 foi elaborado com o objetivo de ilustrar, de forma clara e organizada, a lógica de funcionamento do sistema de controle da luminária. Por meio dele, é possível visualizar as etapas sequenciais de operação, incluindo os modos de cultivo, os períodos de acionamento dos diferentes grupos de LEDs e as transições entre os ciclos de luz e escuro. Essa representação facilita a compreensão global do comportamento do sistema e auxilia na interpretação do fluxo de decisões implementado no projeto.

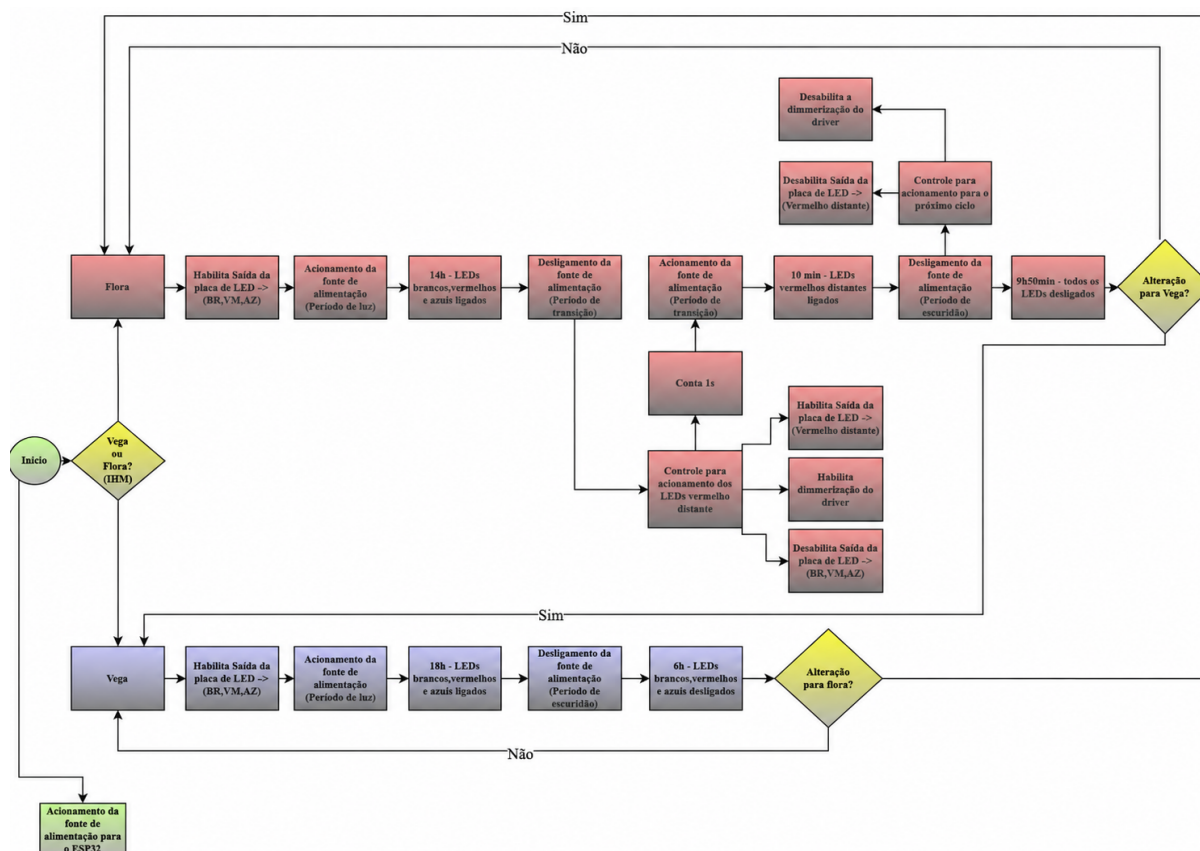
#### 3.2.2.2 Circuito de controle

O circuito apresentado na Figura 28 tem como função realizar o acionamento dos módulos de iluminação a partir dos sinais digitais gerados pelo microcontrolador ESP32. Para isso, foram utilizados módulos de relé com interface optoacoplada, responsáveis pelo controle da alimentação do driver, pela comutação entre o módulo principal de LEDs e a *string* de LEDs vermelho distante, pelo acionamento das lâmpadas comparativas e pela aplicação do sinal de dimerização do driver. A utilização de optoacopladores na entrada dos módulos de relé permite uma separação entre o sinal de controle do microcontrolador e o estágio de acionamento da bobina, contribuindo para maior proteção do ESP32 e melhor imunidade a interferências provenientes das comutações.

O primeiro relé foi utilizado para controlar a alimentação do driver de corrente constante. Dessa forma, o ESP32 pode ligar ou desligar completamente a luminária conforme o período programado. Além de interromper a alimentação durante o período de escuro, esse relé exerce uma função importante durante a transição entre o módulo principal de LEDs e

<sup>1</sup> Versão em alta resolução disponível em: <<https://imgur.com/aKKMpEt>>

Figura 27 – Fluxograma do sistema de controle<sup>1</sup>



Fonte: Autor, 2025.

a *string* de LEDs vermelho distante. Antes da comutação entre os módulos, o driver é desligado, evitando que a troca de carga ocorra com o circuito energizado. Essa estratégia reduz a possibilidade de sobretensões transitórias na saída do driver, protegendo principalmente os LEDs vermelho distante, que operam com menor corrente e possuem limites elétricos específicos. Após a comutação do módulo luminoso e a aplicação do sinal de dimerização, o driver é novamente acionado para alimentar a *string* selecionada de forma segura.

O segundo relé foi utilizado para realizar a comutação do retorno negativo entre o módulo principal de LEDs e a *string* de LEDs vermelho distante. Para isso, foram empregados os contatos normalmente fechado (NF) e normalmente aberto (NO) do relé, permitindo que um dos módulos permaneça conectado na condição de repouso, enquanto o outro seja selecionado quando o relé é acionado. Na implementação do sistema, o contato NF foi utilizado para o módulo principal de LEDs, composto pelas *strings* de LEDs brancos, vermelhos e azuis, enquanto o contato NO foi utilizado para a *string* de LEDs vermelho distante. Dessa forma, quando o relé não está acionado, o sistema mantém o módulo principal selecionado; quando acionado, o retorno negativo é comutado para os LEDs vermelho distante.

O módulo principal de LEDs constitui a principal fonte de radiação da luminária, sendo responsável por fornecer a composição espectral utilizada durante o período de iluminação

ativa. Esse módulo é empregado nas etapas de desenvolvimento da planta, contribuindo para os processos fotossintéticos e fotomorfogênicos por meio da combinação de LEDs brancos, vermelhos e azuis. Já a *string* de LEDs vermelho distante é utilizada especificamente durante o período de floração, sendo acionada apenas em um intervalo determinado do ciclo fotoperiódico. Essa separação permite aplicar a radiação vermelho distante de maneira controlada, contribuindo para a modulação das respostas associadas ao sistema de fitocromos.

O terceiro relé foi destinado ao acionamento das lâmpadas comparativas utilizadas no experimento. Essas lâmpadas operam de forma independente em relação à luminária desenvolvida, permitindo a comparação entre o sistema proposto e uma solução de iluminação convencional. O acionamento por relé possibilita que o ESP32 também controle o fotoperíodo das lâmpadas comparativas, mantendo a sincronização necessária para a condução dos ensaios e garantindo que ambos os sistemas sejam submetidos às condições experimentais definidas.

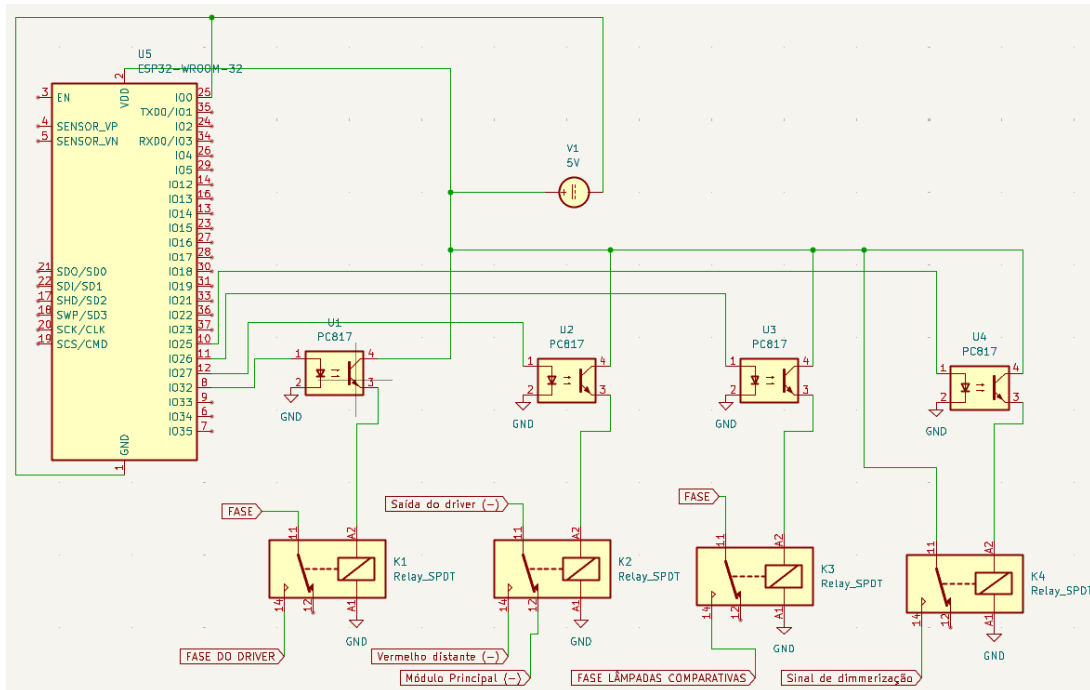
O quarto relé foi utilizado para aplicar um sinal de 5 V à entrada de dimerização do driver durante o acionamento dos LEDs vermelho distante. Essa estratégia possibilita o ajuste da corrente fornecida pelo driver, limitando-a a aproximadamente 525 mA, de modo a respeitar os limites elétricos especificados para essa *string*. Assim, o sistema garante uma operação mais segura dos LEDs vermelho distante, contribuindo para a estabilidade térmica, confiabilidade e vida útil da luminária.

A lógica de controle dos relés foi implementada no ESP32, que coordena a sequência de acionamento conforme o modo de operação selecionado. Os sinais digitais do microcontrolador são aplicados às entradas optoacopladas dos módulos de relé, que realizam o acionamento dos respectivos contatos de potência. Durante o período de iluminação principal, o driver é energizado e o segundo relé permanece na condição correspondente ao módulo principal de LEDs. No intervalo destinado ao vermelho distante, o driver é inicialmente desligado, o segundo relé realiza a comutação do retorno negativo para a *string* de LEDs vermelho distante, o sinal de dimerização é aplicado ao driver e, em seguida, o driver é novamente acionado. Após o período de vermelho distante, os relés são desativados, iniciando-se o intervalo de escuro programado. Dessa forma, o circuito de controle permite o gerenciamento automático da luminária, a proteção dos LEDs durante as transições, o controle das lâmpadas comparativas e a execução do ciclo fotoperiódico proposto.

### 3.2.2.3 Fonte auxiliar e alimentação

Para a alimentação do circuito de controle foi utilizada uma fonte auxiliar de 5 V. Essa fonte foi responsável por suprir o microcontrolador ESP32, os módulos de relé utilizados no acionamento das cargas e o sinal aplicado à entrada de dimerização do *driver*. Dessa forma, uma única fonte auxiliar atende às necessidades do sistema de controle, simplificando a implementação elétrica e reduzindo a quantidade de estágios de conversão de tensão.

Figura 28 – Circuito simplificado de controle



Fonte: Autor, 2026.

Os módulos de relé empregados no projeto possuem entrada de controle optoacoplada, permitindo que os sinais digitais provenientes do ESP32 sejam utilizados para acionar os respectivos relés sem que o microcontrolador comande diretamente as cargas de potência. A alimentação de 5 V é utilizada tanto para o funcionamento dos módulos de relé quanto para a aplicação do nível lógico necessário à entrada de dimerização do *driver*, responsável pelo ajuste da corrente durante o acionamento da *string* de LEDs vermelho distante.

Assim, a fonte auxiliar de 5 V permitiu integrar o sistema de controle, os módulos de acionamento e o sinal de dimerização em uma única alimentação auxiliar. Essa solução contribuiu para uma implementação mais simples e adequada ao protótipo desenvolvido, mantendo o ESP32 responsável pela coordenação automática dos relés conforme o fotoperíodo programado.

Na Figura 29, pode-se observar a representação da fonte auxiliar de 5 V e dos módulos de relé utilizados no circuito de controle da luminária.

### 3.2.2.4 Interface de controle

O sistema de controle da luminária tem como objetivo automatizar o gerenciamento dos ciclos de iluminação de acordo com as fases de desenvolvimento da planta, garantindo o fornecimento adequado de luz em duração e sequência conforme as necessidades fisiológicas de cada estágio. O controle permite a alternância entre os modos vegetativo e floração por meio de uma interface web, acessada pelo usuário através de um navegador, na qual é possível selecionar o modo de operação desejado e acompanhar o estado de funcionamento do sistema.

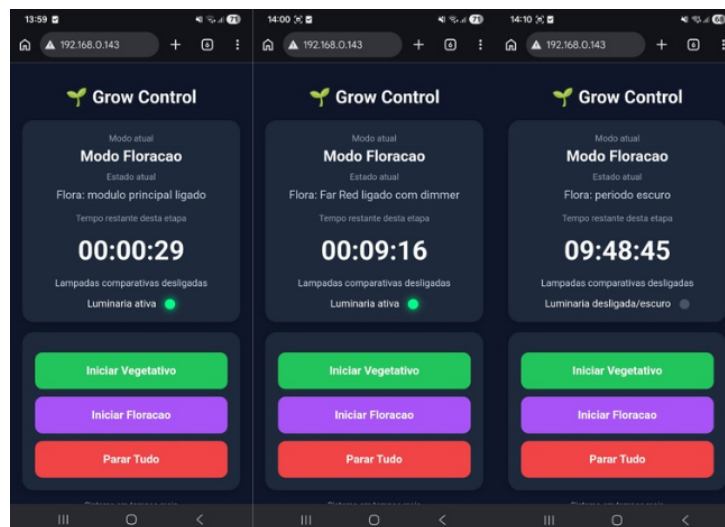
Figura 29 – Fonte auxiliar de 5 V



Fonte: Autor, 2026

Na Figura 30, pode-se observar o aplicativo web em operação. O acionamento dos módulos

Figura 30 – Controle pelo website



Fonte: Autor, 2026

de LEDs foi realizado por meio de relés comandados por um microcontrolador ESP32. Dessa forma, o sistema realiza o chaveamento temporizado dos circuitos de alimentação, ligando e desligando os módulos luminosos conforme o fotoperíodo configurado. Essa solução apresenta simplicidade de implementação, baixo custo e atende às necessidades do experimento, uma vez que o objetivo principal é controlar os períodos de exposição à luz e de escuro.

No modo vegetativo, o relé responsável pelo acionamento das *strings* principais — compostas por LEDs brancos, vermelhos e azuis — permanece acionado durante 18 horas, seguido por um período de 6 horas de desligamento, caracterizando o fotoperíodo 18/6 utilizado nesta etapa. Além do controle do módulo principal, o sistema também realiza o acionamento das lâmpadas comparativas utilizadas no experimento, permitindo que estas operem de forma sin-

cronizada com o ciclo de iluminação definido para a etapa vegetativa.

No modo de floração, o sistema mantém o módulo principal da luminária acionado durante 14 horas de iluminação ativa. Ao término desse período, o relé responsável pelo módulo principal é desligado e o módulo de LEDs vermelho distante é acionado por 10 minutos. Após essa etapa, todos os módulos da luminária permanecem desligados durante 9 horas e 50 minutos, completando o ciclo diário de 24 horas. Para as lâmpadas comparativas utilizadas no experimento, foi adotado um ciclo distinto, composto por 12 horas de iluminação e 12 horas de escuro, permitindo a comparação entre o comportamento das plantas submetidas ao protótipo e às fontes luminosas convencionais.

Durante o acionamento dos LEDs vermelho distante, também é utilizado um relé destinado ao controle da entrada de dimerização do driver. Esse relé aplica um sinal de 5 V ao terminal de dimmer, permitindo ajustar a corrente fornecida aos LEDs vermelho distante durante o período de floração. Dessa forma, além da comutação entre o módulo principal e o módulo vermelho distante, o sistema também controla a condição de operação elétrica do driver durante essa etapa específica do ciclo.

### **3.2.3 Ensaios de validação do sistema**

A etapa de testes e validação do sistema teve como finalidade verificar o desempenho do protótipo frente aos requisitos definidos no projeto, assegurando seu funcionamento adequado e sua conformidade com os parâmetros estabelecidos. Para a validação do projeto, foram realizados ensaios que abrangem aspectos fotométricos, com ênfase na distribuição espectral, além de aspectos elétricos e térmicos. Esses ensaios possibilitaram avaliar a intensidade e a qualidade da radiação emitida pelo protótipo, seu comportamento elétrico durante a operação e a dissipação térmica da luminária.

Além disso, foi conduzida uma comparação entre o protótipo desenvolvido e lâmpadas comerciais, contemplando as fases vegetativa e de floração da espécie utilizada como modelo experimental. Essa comparação foi realizada principalmente por meio de observações visuais e morfológicas, considerando características como desenvolvimento da planta, espessura do caule, altura, largura, coloração das folhas e formação de botões florais. Não foram analisados aspectos relacionados à composição química das plantas, como a presença ou concentração de metabólitos secundários, uma vez que os testes foram conduzidos com crisântemo (*Chrysanthemum morifolium*) em substituição à espécie originalmente prevista. Caso os ensaios fossem realizados com a planta medicinal de interesse, essa análise poderia constituir uma etapa complementar relevante para avaliar a influência da iluminação sobre a qualidade química do material vegetal produzido.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os ensaios realizados para a caracterização da luminária desenvolvida, bem como os resultados obtidos a partir da avaliação experimental do protótipo e do cultivo conduzido em ambiente controlado. Inicialmente, são descritos e analisados os ensaios fotométricos, com ênfase na distribuição espectral emitida pelos módulos de LEDs e na determinação dos parâmetros relacionados à radiação disponível para o desenvolvimento vegetal. Em seguida, são apresentados os ensaios elétricos e térmicos, utilizados para verificar as condições de operação da luminária, os níveis de tensão e corrente, a potência estimada, a estabilidade do sistema de acionamento e o comportamento térmico do conjunto durante o funcionamento. Por fim, são discutidas as respostas observadas nas plantas ao longo do experimento, considerando a comparação entre a luminária desenvolvida e as lâmpadas comerciais utilizadas como referência. Essa avaliação contempla as fases vegetativa e de floração, incluindo alterações morfológicas como o desenvolvimento da parte aérea, o engrossamento do caule, a arquitetura da planta, a coloração das folhas e a formação de botões florais. Dessa forma, o capítulo permite avaliar tanto o desempenho técnico do protótipo quanto sua influência prática no cultivo em ambiente controlado.

### 4.1 ENSAIO FOTOMÉTRICO

Foi realizado um ensaio fotométrico com o objetivo de avaliar a composição espectral da luminária, verificando a distribuição das faixas de comprimento de onda emitidas e os parâmetros ópticos fornecidos durante sua operação. Para a obtenção desses dados, a luminária foi submetida a medições em uma esfera integradora modelo PMS-80, no laboratório de fotometria da Intral. A Figura 31 apresenta as imagens da luminária durante o ensaio.

Como a esfera integradora utilizada não fornece diretamente o valor de PPF, esse parâmetro foi obtido posteriormente a partir dos dados de SPD gerados pelo equipamento. Para isso, foi utilizado o método proposto por Ashdown (2015), no qual é realizado o somatório da distribuição espectral na faixa de 400 nm a 700 nm, permitindo estimar o fluxo de fótons fotossintéticos emitido pela luminária.

A conversão dos dados foi realizada por meio do software *Photon Desk*, desenvolvido por pesquisadores da Universidade Federal de Santa Maria. O programa utiliza como entrada o arquivo em formato Excel gerado pela esfera integradora e, a partir dos dados espectrais medidos, realiza o processamento necessário para a determinação do PPF. O software possui interface gráfica e é executado por meio de um arquivo compilado em MATLAB, facilitando a análise dos dados fotométricos obtidos no ensaio. Na Figura 32 pode-se observar o software mencionado.

Figura 31 – Ensaio na esfera integradora

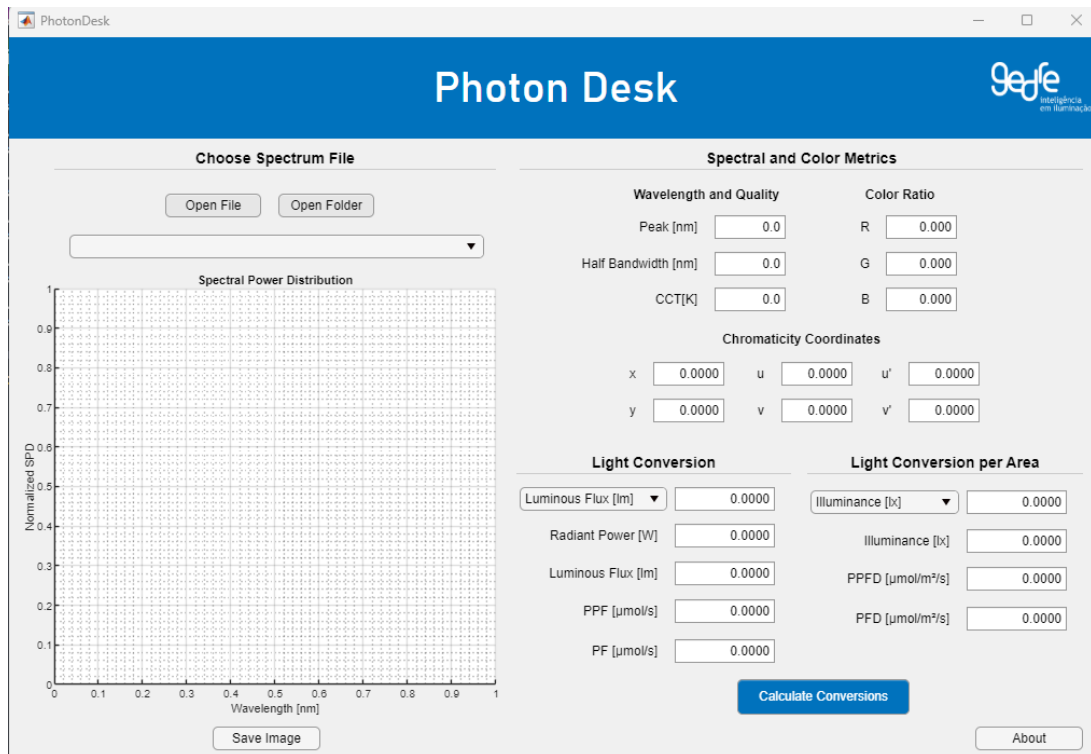


Fonte: Autor, 2026

Dessa forma, além dos resultados fornecidos diretamente pela esfera integradora, foi possível complementar a caracterização fotométrica da luminária por meio do pós-processamento dos dados espectrais. Esse procedimento permitiu avaliar de maneira mais adequada o desempenho do protótipo quanto à radiação efetivamente disponível para os processos fotossintéticos das plantas.

A partir do ensaio fotométrico realizado, foi possível verificar que o módulo principal do protótipo apresentou comportamento espectral compatível com o esperado para a aplicação proposta. O espectro obtido apresentou uma distribuição ampla, característica da emissão dos LEDs brancos utilizados no projeto, contemplando diferentes faixas do espectro visível. Além disso, foram observados picos de emissão nas regiões do azul, em aproximadamente 450 nm, e do vermelho profundo, em torno de 660 nm, correspondentes às faixas espectrais dos LEDs específicos adicionados ao módulo principal. Esses resultados confirmam que a composição espectral da luminária está de acordo com as especificações dos LEDs selecionados e com a estratégia de iluminação definida para o desenvolvimento vegetal, conforme apresentado na

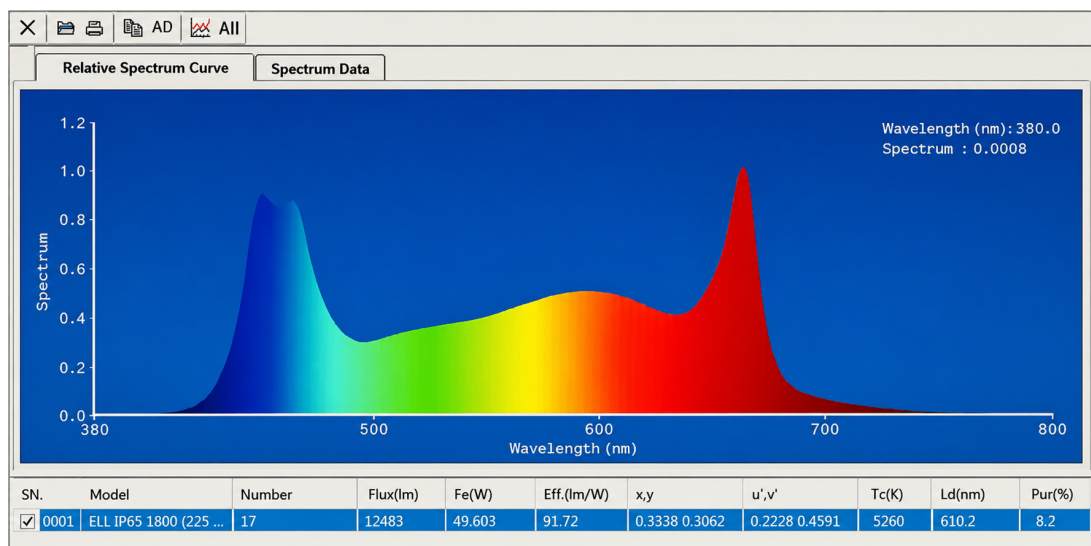
Figura 32 – PhotonDesk



Fonte: Autor, 2026

Figura 33.

Figura 33 – Espectro módulo Principal

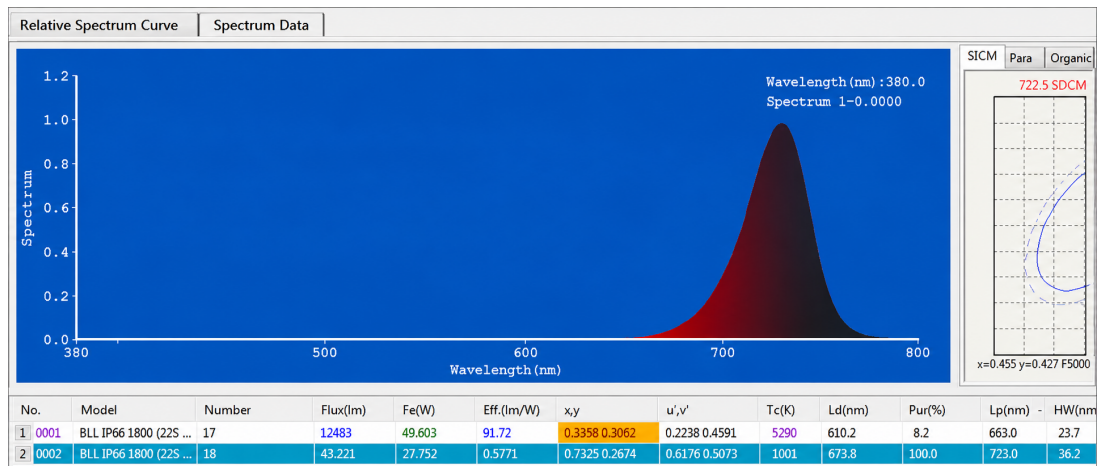


Fonte: Autor, 2026

A *string* de LEDs vermelho distante também apresentou resultado compatível com o esperado. Conforme observado na Figura 34, a emissão concentrou-se na região do vermelho distante, de acordo com a faixa espectral indicada no *datasheet* dos LEDs utilizados. Esse comportamento confirma que o módulo responsável pela emissão em vermelho distante opera

dentro da região prevista, sendo adequado para sua aplicação durante o período de floração e para a estratégia de controle fotoperiódico adotada no projeto.

Figura 34 – Espectro Far red



Fonte: Autor, 2026

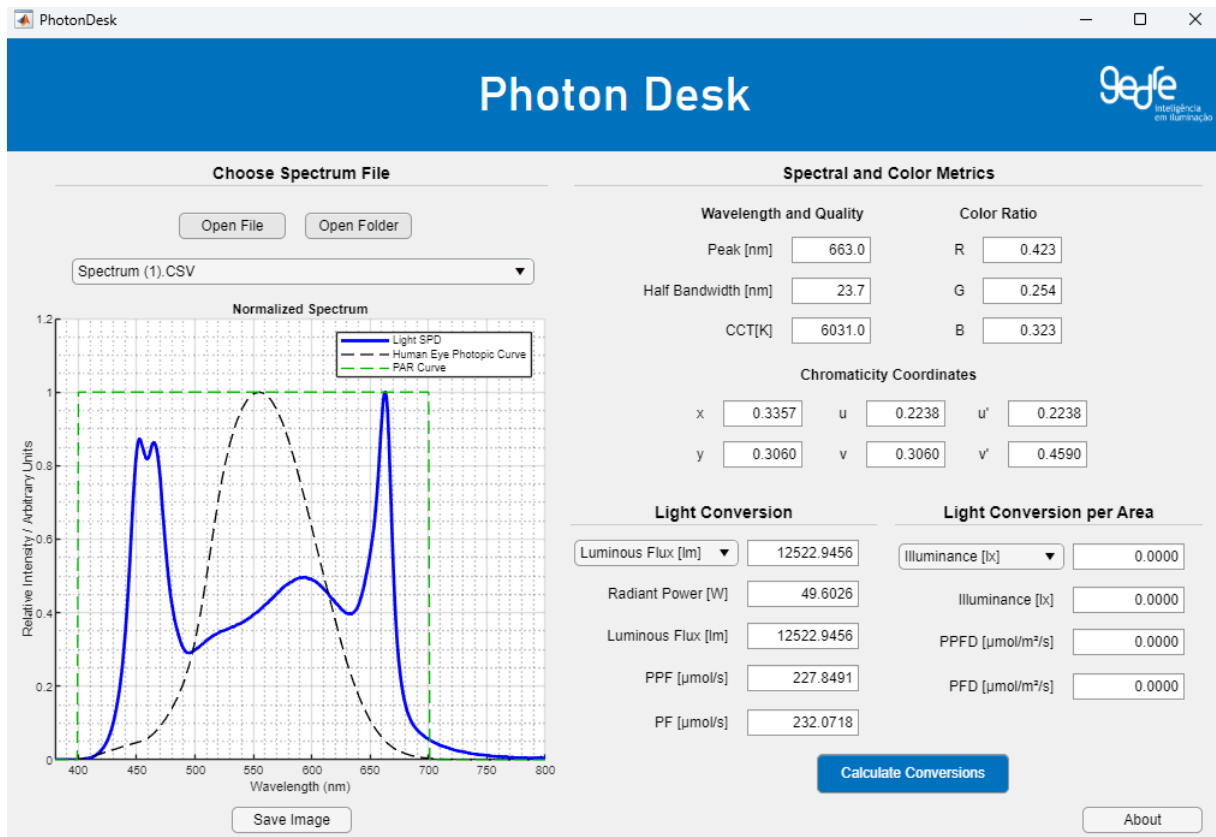
Além da análise dos espectros emitidos, os dados de SPD obtidos na esfera integradora foram processados no software *Photon Desk*, utilizando o método de Ashdown (2015) para a determinação do PPF. O valor obtido para o módulo principal foi de 227,8491  $\mu\text{mol/s}$ , conforme apresentado na Figura 35, valor correspondente a 77% do valor nominal do LED LM301H qual possui um PPE de 3.06. Esse resultado permite complementar a caracterização fotométrica da luminária, indicando a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa fornecida pelo protótipo durante sua operação.

## 4.2 ENSAIOS ELÉTRICOS

Foram realizadas medições elétricas com o objetivo de verificar os valores de tensão e corrente da luminária durante sua operação, assegurando que o comportamento elétrico do sistema estivesse compatível com o especificado no projeto. As medições foram realizadas com o auxílio de um multímetro digital, permitindo avaliar de forma prática o funcionamento do driver, o acionamento das diferentes *strings* de LEDs e os níveis elétricos aplicados aos módulos luminosos.

Os testes foram conduzidos durante os principais modos de operação da luminária, incluindo o acionamento do módulo principal de LEDs e da *string* de LEDs vermelho distante. A potência elétrica foi estimada a partir da relação entre os valores de tensão e corrente medidos. Dessa forma, foi possível verificar se as correntes fornecidas aos LEDs estavam dentro das condições previstas, especialmente no caso dos LEDs vermelho distante, cuja corrente foi ajustada por meio do sinal aplicado à entrada de dimerização do driver. Esses ensaios permitiram vali-

Figura 35 – Resultado Photon Desk



Fonte: Autor, 2026

dar o funcionamento elétrico básico do protótipo e confirmar a operação segura dos módulos luminosos.

Nos ensaios elétricos realizados, foram medidos os valores de corrente e tensão na entrada da placa da luminária durante a operação do módulo principal. A corrente obtida foi de 1045 mA, enquanto a tensão medida foi de 116,5 V. A partir desses valores, a potência elétrica foi calculada pela relação entre tensão e corrente, resultando em aproximadamente 121,74 W.

Esse resultado apresenta boa compatibilidade com a potência prevista para o protótipo, próxima de 120 W, indicando que o conjunto formado pelo driver e pela placa de LEDs operou conforme o dimensionamento realizado. Além disso, a corrente medida ficou próxima ao valor nominal definido para o sistema, demonstrando que o driver de corrente constante forneceu a corrente esperada para o acionamento das *strings* principais de LEDs.

#### 4.3 ENSAIO TÉRMICO

Foi realizada uma avaliação térmica com o objetivo de verificar as temperaturas atingidas pela luminária durante sua operação. O procedimento buscou analisar o comportamento térmico do protótipo em condição de funcionamento, permitindo observar se as temperaturas superficiais dos módulos de LEDs permaneciam em níveis compatíveis com uma operação se-

gura do sistema.

As medições foram realizadas com o auxílio de um termômetro infravermelho com mira laser, evitando o contato direto com os módulos de LEDs e reduzindo o risco de danos à placa ou às conexões do protótipo. As temperaturas foram verificadas em diferentes pontos da luminária, principalmente nas regiões próximas aos LEDs e na superfície da placa de alumínio, durante o acionamento do módulo principal. Embora esse método não permita a medição direta do ponto Tc dos LEDs, os valores obtidos fornecem uma estimativa prática da condição térmica do conjunto. Dessa forma, foi possível avaliar se a dissipação térmica proporcionada pela placa de alumínio era suficiente para o funcionamento do protótipo, contribuindo para a verificação da estabilidade térmica e da operação segura da luminária durante os ensaios.

Na avaliação térmica realizada, foram medidas as temperaturas superficiais da luminária durante sua operação, conforme apresentado na Figura 36. O ensaio foi conduzido com a luminária posicionada em sua condição normal de uso, ou seja, com os LEDs voltados para baixo. Antes da realização das medições, o protótipo permaneceu ligado por aproximadamente duas horas, de modo a permitir a estabilização térmica do conjunto e obter valores mais representativos da condição real de operação.

Figura 36 – Medições térmicas



Fonte: Autor, 2026

A medição na parte traseira da placa de LEDs, correspondente à região oposta aos componentes, apresentou temperatura de 52,2 °C. Já na região central da placa, próxima ao LED

analisado, foi registrada a maior temperatura do ensaio, com valor de 62,9 °C. Esses valores indicam que a placa de alumínio utilizada no protótipo contribuiu de forma eficiente para a dissipação térmica do conjunto, mantendo as temperaturas superficiais em níveis adequados para a operação experimental da luminária. A maior temperatura observada na região dos LEDs era esperada, devido à concentração de potência dissipada nessa área. Ainda assim, os resultados obtidos não indicaram aquecimento excessivo durante o ensaio, permitindo verificar que, para as condições de operação avaliadas, não foi necessária a utilização de um dissipador de calor adicional no conjunto. Dessa forma, o comportamento térmico do protótipo mostrou-se compatível com a aplicação proposta.

#### 4.4 COMPARAÇÃO ENTRE UMA LÂMPADA COMERCIAL E O PROTÓTIPO

Foi realizado um comparativo entre duas lâmpadas comerciais *high power*, de 62 W cada, operando exclusivamente com luz branca, e o protótipo desenvolvido. O objetivo foi avaliar a influência da qualidade da luz no desenvolvimento das plantas, considerando parâmetros como morfologia, altura, número de botões florais, espessura do caule e massa final. As plantas foram cultivadas no mesmo ambiente e sob condições semelhantes de água, luz ambiente, nutrientes, substrato e fotoperíodo, sendo a iluminação — proveniente do protótipo ou das lâmpadas comerciais — o principal fator variável entre os grupos avaliados.

Para o cultivo, foi utilizada uma mistura composta por quatro partes de substrato comercial e uma parte de húmus de minhoca, buscando fornecer condições adequadas para o desenvolvimento inicial das plantas. Além disso, tanto o protótipo quanto as lâmpadas comerciais foram posicionados a uma distância de aproximadamente 60 cm de suas respectivas plantas, de modo a padronizar a condição de exposição luminosa entre os tratamentos. Na Figura 37, podem ser observados os dois sistemas de iluminação e suas respectivas plantas no início do experimento.

Durante a fase de floração, o protótipo realizou o acionamento complementar da *string* de LEDs vermelho distante, conforme definido na estratégia de controle fotoperiódico do sistema. A Figura 38 apresenta o módulo vermelho distante em operação durante o experimento, evidenciando a aplicação dessa faixa espectral à planta cultivada sob a luminária desenvolvida. Esse registro permite visualizar uma das principais diferenças funcionais entre o protótipo e as lâmpadas comerciais comparativas, uma vez que estas operaram apenas com luz branca, sem alteração espectral ao longo do ciclo. Além da caracterização elétrica, térmica e fotométrica da luminária, foi realizada a avaliação do desenvolvimento das plantas submetidas ao sistema de iluminação proposto. Essa análise teve como objetivo observar os efeitos da composição espectral e do controle fotoperiódico sobre a morfologia das plantas ao longo do experimento, considerando aspectos visuais e estruturais, como crescimento da parte aérea, espessura do caule,

Figura 37 – Protótipo e Lâmpadas comercial



**Protótipo**

**Lâmpada comercial**

Fonte: Autor, 2026

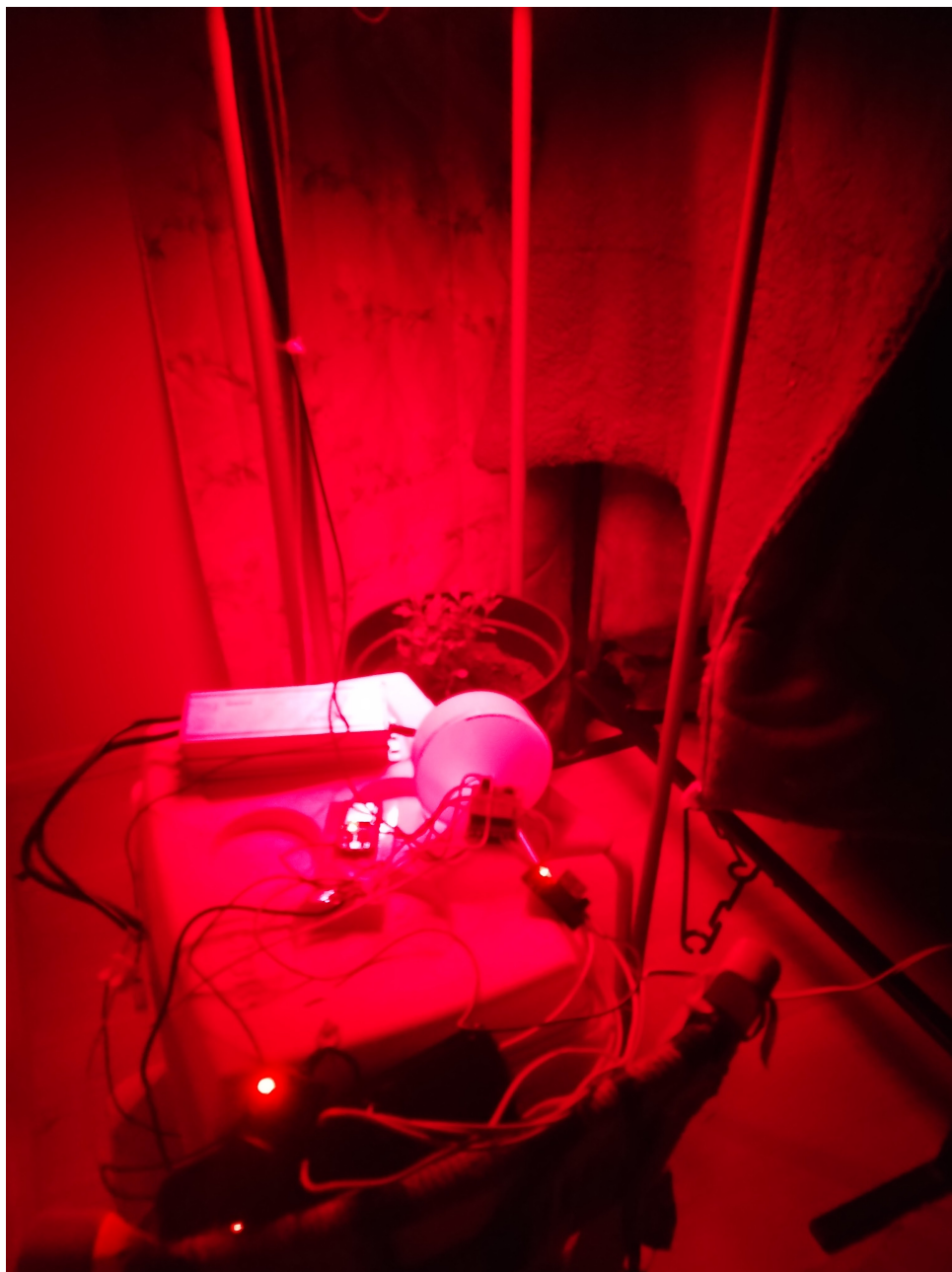
desenvolvimento foliar e formação de estruturas florais.

A avaliação foi dividida em duas etapas principais, correspondentes às fases vegetativa e de floração. Na fase vegetativa, foram observadas as respostas relacionadas ao crescimento inicial e ao fortalecimento estrutural da planta. Já na fase de floração, foram analisadas as alterações associadas à indução floral e ao desenvolvimento das estruturas reprodutivas, permitindo verificar a influência da estratégia de iluminação adotada sobre o ciclo fotoperiódico da espécie utilizada como modelo experimental.

#### **4.4.1 Fase vegetativa**

Durante a fase vegetativa, foi observada diferença no desenvolvimento do caule entre as plantas submetidas à luminária desenvolvida e aquelas cultivadas sob as lâmpadas comerciais comparativas. As plantas expostas ao protótipo apresentaram diâmetros de caule de 3,36 mm e 2,65 mm, enquanto as plantas submetidas às lâmpadas comerciais apresentaram valores de 1,92 mm e 1,99 mm. Considerando os valores médios, o caule das plantas cultivadas sob a luminária desenvolvida apresentou maior espessura em relação ao grupo comparativo, indicando uma possível influência da composição espectral proposta no fortalecimento estrutural da planta durante essa etapa.

Figura 38 – Sistema módulo vermelho distante



Fonte: Autor, 2026

Na Figura 39, são apresentadas as medições realizadas nos caules, destacando os maiores valores obtidos em cada condição de iluminação. Apesar da diferença observada na espessura do caule, não foram verificadas alterações perceptíveis no tamanho das folhas durante a fase vegetativa. Dessa forma, a principal resposta morfológica observada nessa etapa esteve relacionada ao engrossamento do caule, enquanto o desenvolvimento foliar apresentou comportamento visualmente semelhante entre os tratamentos avaliados.

Além disso, durante a fase vegetativa, a planta cultivada sob a luminária desenvolvida passou a apresentar regiões com coloração marrom em algumas folhas, comportamento que

Figura 39 – Caules na fase vegetativa



Fonte: Autor, 2026

não foi observado na planta mantida sob as lâmpadas comerciais comparativas. Essa alteração visual foi registrada ao longo do experimento e pode estar associada a fatores como intensidade luminosa, resposta fisiológica ao espectro aplicado ou condições ambientais do cultivo. No entanto, como não foram realizados ensaios específicos para identificação da causa, esse resultado foi tratado apenas como uma observação morfológica complementar. Apesar dessa alteração de coloração, não foram observadas outras interferências significativas no crescimento e no desenvolvimento da planta durante a fase vegetativa.

#### 4.4.2 Fase de floração

Durante a fase de floração, não foi observada a abertura completa das flores em nenhuma das plantas avaliadas dentro do período experimental. No entanto, foram verificadas diferenças visuais importantes entre a planta cultivada sob a luminária desenvolvida e a planta submetida às lâmpadas comerciais comparativas. A planta exposta ao protótipo apresentou a formação de diversos botões florais, enquanto a planta mantida sob as lâmpadas comerciais apresentou apenas um botão floral visível, conforme apresentado na Figura 40. Esse resultado indica que, embora a floração completa não tenha ocorrido, a luminária desenvolvida favoreceu uma resposta mais intensa relacionada à indução e ao desenvolvimento inicial das estruturas florais. Em relação à altura, as plantas apresentaram valores semelhantes, ficando em torno de 15 cm, conforme apresentado na Figura 41. Dessa forma, a principal diferença observada nessa etapa não esteve relacionada ao crescimento vertical, mas sim à arquitetura da planta. A planta cultivada sob o protótipo apresentou uma estrutura mais aberta, com maior afastamento entre os ramos, o que possibilitou maior entrada de luz nas regiões inferiores da planta. Esse comportamento pode ter

Figura 40 – Botões florais



Fonte: Autor, 2026

contribuído para o surgimento de botões florais também em regiões mais baixas. A diferença na

Figura 41 – Altura das plantas



Protótipo

Lâmpadas comerciais

Fonte: Autor, 2026

abertura da planta também pôde ser observada pela largura medida durante a fase de floração, conforme apresentado na Figura 42. A planta submetida à luminária desenvolvida apresentou largura de aproximadamente 16 cm, enquanto a planta cultivada sob as lâmpadas comerciais apresentou largura próxima de 14,5 cm. Essa maior abertura pode estar associada à composição espectral da luminária desenvolvida e, em especial, à presença da radiação vermelho distante

aplicada durante o ciclo de floração. Como essa faixa espectral está relacionada à atuação dos fitocromos e às respostas fotomorfogênicas das plantas, é possível que tenha influenciado a arquitetura observada. No entanto, devido ao número reduzido de amostras, essa relação deve ser interpretada como uma hipótese baseada na resposta visual observada.

Figura 42 – Largura das plantas



Protótipo

Lâmpadas comerciais

Fonte: Autor, 2026

Também foram observadas diferenças na coloração e na orientação das folhas. A planta cultivada sob o protótipo apresentou folhas com tonalidade verde mais clara e com as pontas voltadas para cima, enquanto a planta submetida às lâmpadas comerciais apresentou folhas de coloração verde mais escura e com aspecto mais inclinado para baixo. Além disso, a alteração de coloração marrom observada anteriormente durante a fase vegetativa permaneceu durante a fase de floração na planta submetida à luminária desenvolvida, tornando-se mais evidente ao longo do experimento. As Figuras 43 e 44 apresentam o aspecto geral das plantas, até o momento final de avaliação considerado neste trabalho. A comparação visual evidencia as diferenças morfológicas observadas ao longo do experimento entre a planta cultivada sob a luminária desenvolvida e a planta mantida sob as lâmpadas comerciais comparativas. De modo geral, a planta submetida ao protótipo apresentou maior abertura estrutural, maior largura e maior quantidade de botões florais, enquanto a planta sob iluminação comercial apresentou desenvolvimento mais compacto e menor formação de botões no mesmo período.

Figura 43 – Planta sob iluminação do protótipo



Fonte: Autor, 2026

Figura 44 – Planta sob iluminação das lâmpadas comerciais



Fonte: Autor, 2026

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar uma luminária com alteração de espectro destinada ao cultivo de plantas medicinais em ambiente controlado, utilizando como base a relação entre composição espectral, fotoperíodo e desenvolvimento vegetal. A proposta foi fundamentada no uso de LEDs de diferentes faixas espectrais, permitindo a emissão de um espectro principal durante o ciclo da planta e o acionamento de uma *string* de LEDs vermelho distante durante a fase de floração. Devido às restrições legais relacionadas ao cultivo de *Cannabis sativa* L., os ensaios experimentais foram realizados com crisântemo (*Chrysanthemum morifolium*), uma espécie de dia curto tal qual a *Cannabis* adequada para a avaliação do comportamento fotoperiódico.

O protótipo desenvolvido demonstrou funcionamento compatível com a proposta do projeto. O sistema de controle, baseado no microcontrolador ESP32, possibilitou o acionamento automático dos módulos de iluminação, a seleção entre os modos vegetativo e floração, o controle da alimentação do *driver*, o acionamento das lâmpadas comparativas e a aplicação do sinal de dimerização para a *string* de LEDs vermelho distante. Essa configuração permitiu a execução dos ciclos fotoperiódicos definidos e a operação independente dos diferentes módulos luminosos, atendendo aos requisitos funcionais estabelecidos para a luminária.

Nos ensaios fotométricos, o módulo principal apresentou comportamento espectral coerente com os LEDs utilizados, com distribuição ampla característica dos LEDs brancos e picos nas regiões do azul, em aproximadamente 450 nm, e do vermelho profundo, em torno de 660 nm. A *string* de LEDs vermelho distante também apresentou emissão compatível com a faixa esperada, confirmando a adequação espectral do conjunto para a estratégia de iluminação proposta. A partir dos dados obtidos na esfera integradora e processados pelo software *Photon Desk*, foi obtido um PPF de 227,8491  $\mu\text{mol/s}$  para o módulo principal, indicando a capacidade da luminária de fornecer radiação útil ao desenvolvimento fotossintético das plantas.

Os resultados elétricos também indicaram coerência com o dimensionamento do sistema. A corrente medida na entrada da placa foi de 1045 mA, com tensão de 116,5 V, resultando em potência calculada de aproximadamente 121,74 W. Esse valor ficou próximo da potência prevista para o protótipo, demonstrando que o conjunto formado pelo *driver* e pela placa de LEDs operou de forma adequada. Na avaliação térmica, foram medidas temperaturas de 52,2 °C na parte traseira da placa e 62,4 °C na região central próxima aos LEDs, após estabilização térmica do conjunto em posição de uso. Esses resultados indicaram que a placa de alumínio utilizada contribuiu de forma eficiente para a dissipação de calor, não sendo necessária a utilização de dissipador adicional nas condições avaliadas.

Em relação ao desenvolvimento das plantas, foram observadas diferenças morfológicas

entre o cultivo sob a luminária desenvolvida e o cultivo sob as lâmpadas comerciais comparativas. Durante a fase vegetativa, as plantas submetidas ao protótipo apresentaram maior espessura de caule, com valores de 3,36 mm e 2,65 mm, enquanto as plantas sob iluminação comercial apresentaram 1,92 mm e 1,99 mm. Essa diferença indica uma possível influência positiva da composição espectral proposta no fortalecimento estrutural das plantas. No entanto, não foram observadas diferenças perceptíveis no tamanho das folhas, e a planta submetida ao protótipo apresentou regiões de coloração marrom, aspecto que deve ser investigado em estudos posteriores.

Na fase de floração, nenhuma das plantas apresentou abertura completa das flores dentro do período avaliado. Ainda assim, a planta cultivada sob a luminária desenvolvida apresentou maior quantidade de botões florais em comparação à planta submetida às lâmpadas comerciais, que apresentou apenas um botão visível. As alturas permaneceram semelhantes, em torno de 15 cm, porém a planta sob o protótipo apresentou maior abertura estrutural e largura aproximada de 16 cm, enquanto a planta sob as lâmpadas comerciais apresentou largura próxima de 14,5 cm. Essa maior abertura pode estar relacionada à composição espectral da luminária e à presença do vermelho distante durante o ciclo de floração, embora essa relação não possa ser afirmada de forma conclusiva devido ao número reduzido de amostras.

Dessa forma, os resultados obtidos indicam que a luminária desenvolvida é tecnicamente viável e apresentou desempenho compatível com a proposta do trabalho, tanto em relação aos aspectos elétricos, térmicos e fotométricos quanto em relação à resposta observada nas plantas. O protótipo permitiu o controle do fotoperíodo e da composição espectral, apresentando potencial para aplicações em cultivos controlados de espécies medicinais. Entretanto, os resultados morfológicos devem ser interpretados como indicativos, uma vez que o experimento foi conduzido com número reduzido de plantas, em um período limitado de avaliação e em uma condição climática específica do ano, correspondente ao período de outono/inverno.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se ampliar o número de amostras e o tempo de cultivo, permitindo uma análise estatística mais robusta das respostas morfológicas e fisiológicas. Também se recomenda repetir os ensaios em diferentes períodos climáticos, como primavera e verão, a fim de verificar a influência das condições ambientais sobre o desenvolvimento das plantas e sobre a resposta à iluminação artificial. Além disso, sugere-se avaliar diferentes doses de radiação vermelho distante, monitorar parâmetros como massa seca, área foliar, teor de clorofila e número de botões florais, além de investigar a causa da coloração marrom observada nas folhas. Por fim, caso haja viabilidade legal e regulatória, a aplicação do sistema em espécies medicinais de maior interesse terapêutico poderá contribuir para validar de forma mais direta o potencial da luminária desenvolvida.

## REFERÊNCIAS

- Almeida, C. C. **Sistema eletrônico baseado em diodos emissores de luz (LEDs) para aplicação em estudo de fisiologia vegetal**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014.
- AMS OSRAM. **GW Q9LR32.HW High-Power LED Datasheet**. 2023. Datasheet. Accessed: 2025-11-19. Disponível em: <<https://look.ams-osram.com/m/18cf2ee19aaacf01/original/GW-Q9LR32-HW.pdf>>.
- Ashdown, I. **Photometry and Photosynthesis: From Photometry to PPFD (Revised)**. 2015.
- Barnes, C. *et al.* Accuracy of quantum sensors measuring yield photon flux and photosynthetic photon flux. **HortScience**, v. 28, n. 12, p. 1197–1200, 1993.
- Brasil. **Lei nº 11.343, de 23 de agosto de 2006: Institui o Sistema Nacional de Políticas Públicas sobre Drogas (SISNAD)**. 2006. Diário Oficial da União. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2006/lei/111343.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/111343.htm)>. Acesso em: 10 dez. 2025.
- Cavallaro, V.; Muleo, R. The effects of led light spectra and intensities on plant growth. **Plants**, v. 11, n. 15, p. 1911, 2023. Acesso em: 28 set. 2025.
- Chandler, D. L. **Explained: Phonons**. 2010. MIT News Office. Acesso em: 4 out. 2025. Disponível em: <<https://news.mit.edu/2010/explained-phonons-0706>>.
- Chibani, K.; Gherli, H.; Fan, M. The role of blue light in plant stress responses: modulation through photoreceptors and antioxidant mechanisms. **Frontiers in Plant Science**, 2025. Acesso em: 14 set. 2025.
- Christie, J. M. Phototropin blue-light receptors. **Annual Review of Plant Biology**, v. 58, p. 21–45, 2007.
- Chuang, Y. C. Spectral power distribution. In: SHAMEY, R. (Ed.). **Encyclopedia of Color Science and Technology**. Cham: Springer, 2023.
- CO., L. S. R. **SRD-05VDC-SL-C Mini Relay Datasheet**. 2015. Datasheet (PDF). Accessed: 2025-11-19. Disponível em: <<https://www.circuitbasics.com/wp-content/uploads/2015/11/SRD-05VDC-SL-C-Datasheet.pdf>>.
- Conrad, C. **Hemp – O uso medicinal e nutricional da maconha**. Rio de Janeiro, RJ: Record, 2001. 384 p.
- Devlin, P. F.; Christie, J. M.; Terry, M. J. Many hands make light work. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, n. 12, p. 3071–3077, 2007.
- Dias, M. P. **Avaliação do emprego de um pré-regulador Boost de baixa frequência no acionamento de LEDs de iluminação**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufjf.br/jspui/bitstream/ufjf/1798/1/marcelopaschoaldias.pdf>>.

Dorais, M.; Gosselin, A. Physiological response of greenhouse vegetable crops to supplemental lighting. **Acta Horticulturae**, v. 580, p. 59–67, 2002.

Dou, H.; Niu, G.; Gu, M. Pre-harvest uv-b radiation and photosynthetic photon flux density interactively affect plant photosynthesis, growth, and secondary metabolites accumulation in basil (*ocimum basilicum*) plants. **Agronomy**, v. 9, n. 8, p. 434, 2019.

Espenlaub, A. C. *et al.* Evidence of trap-assisted auger recombination in low radiative efficiency mbe-grown iii-nitride leds. **Applied Physics Letters**, v. 114, n. 18, 2019.

Gao, H. *et al.* Editorial: Structure and function of chloroplasts, volume iii. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2023.1145680/full>>.

Gayral, B. Leds for lighting: Basic physics and prospects for energy savings. **Comptes Rendus Physique**, v. 18, n. 7-8, p. 453–461, 2017.

Holweg, T. e. a. Influence of red and white led spectra on growth and secondary metabolites of *Cannabis sativa*. **Plants**, v. 13, n. 5, p. 834, 2024.

Hourfane, S. *et al.* A comprehensive review on cannabis sativa: Ethnobotany, phytochemistry, molecular docking and biological activities. **Plants**, v. 12, n. 6, p. 1245, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/plants12061245>>.

Intral S.A. **Ficha Técnica Programável IP67 – 150 W (Rev.01)**. 2025. Technical datasheet.

Koch, M. A. The plant model system arabidopsis set in an evolutionary, systematic, and spatio-temporal context. **Journal of Experimental Botany**, v. 70, n. 16, p. 4239–4251, 2019.

Kusuma, P.; Pattison, P. M.; Bugbee, B. From physics to fixtures to food: Current and potential led efficacy. **Horticulture Research**, v. 7, p. 56, 2020.

Lancaster, J. E.; Downes, K. S.; Zieslin, N. The photomorphogenic responses of chrysanthemum morifolium to end-of-day treatments with red and far-red light. **Physiologia Plantarum**, Wiley, v. 97, n. 4, p. 584–590, 1996.

Liu, J. *et al.* Advances in research and application of techniques for measuring photosynthetically active radiation. **Remote Sensing**, v. 17, n. 10, p. 1765, 2025. Acesso em: 20 set. 2025.

Medeiros, F. C. *et al.* Uso medicinal da cannabis sativa (cannabaceae) como alternativa no tratamento da epilepsia. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 41510–41523, 2020.

Medicina S/A. **Mercado da cannabis medicinal deve movimentar R\$ 699 milhões em 2023 no Brasil**. 2023. Acesso em: 23 ago. 2025. Disponível em: <<https://medicinasa.com.br/>>.

Mishra, P.; Panigrahi, K. C. Gigantea – an emerging story. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p. 8, 2015.

Nguyen, T. K. L. *et al.* Effects of white led lighting with specific shorter blue and/or green wavelength on the growth and quality of two lettuce cultivars in a vertical farming system. **Agronomy**, v. 11, n. 11, p. 2111, 2021.

- Paradiso, R.; Proietti, S. Light-quality manipulation to control plant growth and photomorphogenesis in greenhouse horticulture. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 41, p. 742–780, 2022.
- Pashiardis, A. e. a. The effect of light intensity and light spectrum on *Cannabis sativa* morphology and photosynthesis during vegetative growth. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 1–12, 2021.
- Qiao, J. *et al.* Effect of led lights on morphological construction and leaf photosynthesis of lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Horticulturae**, v. 11, n. 1, p. 43, 2025.
- Randall, W. C.; Lopez, R. G. Comparison of supplemental lighting from high-pressure sodium lamps and light-emitting diodes during bedding plant seedling production. **HortScience**, v. 49, n. 5, p. 589–595, 2014.
- Reichel, P. *et al.* Harvesting light: The interrelation of spectrum, plant density, secondary metabolites, and cannabis sativa L. yield. **Agronomy**, v. 14, n. 11, p. 2565, 2024.
- Runckle, E. *et al.* Lighting young plants indoors. In: **The Indoor Lighting Guide**. [S.l.]: GrowerTalks, Michigan State University e colaboradores, 2021. p. 4–5.
- Samsung Electronics Co., Ltd. **LM301H (CRI 80) Middle Power LED Series 3030 – Data Sheet, Rev. 5.4**. 2022. Datasheet. Accessed: 2025-11-19. Disponível em: <[https://download.led.samsung.com/led/file/resource/2022/05/Data\\_Sheet\\_LM301H\\_CRI80\\_Rev.5.4.pdf](https://download.led.samsung.com/led/file/resource/2022/05/Data_Sheet_LM301H_CRI80_Rev.5.4.pdf)>.
- Santos, J. L. R. **Drogas: Psicologia e crime**. Porto Alegre, RS: Sagra Luzzatto, 1997. O uso de drogas leva à marginalidade, p. 19-21; Maconha: a droga conhecida dos jovens e dos velhos, p. 38-40; Haxixe e óleo de haxixe, p. 40-42.
- Santos, T. S. d. *et al.* Estudo comparativo do desempenho energético e da eficiência luminosa de lâmpadas fluorescentes tubulares e de leds. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 2, p. 223–232, 2015.
- Shang, Y.-M. *et al.* White light-emitting diodes (leds) at domestic lighting levels and retinal injury in a rat model. **Environmental Health Perspectives**, Environmental Health Perspectives, v. 122, n. 3, p. 269–276, 2014.
- Sharma, N. *et al.* Phytochemicals, therapeutic benefits, and applications of chrysanthemum flower: A review. **Heliyon**, Elsevier, v. 9, p. e20232, 2023.
- Silva, Indianara. Uma nova luz sobre o conceito de fóton: Para além de imagens esquizofrênicas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 4, p. 4204–4211, 2015.
- Silva, V. G.; Silva, K. K. F.; Dantas, B. B. *Cannabis sativa* L. (cannabaceae): alternativa para o tratamento da dor oncológica. **Revista Fitos**, 2023. Ahead of print. Disponível em: <<http://revistafitos.far.fiocruz.br/index.php/revista-fitos/article/view/1384>>.
- Singh, P.; Tan, C. M. Degradation physics of high power leds in outdoor environment and the role of phosphor in the degradation process. **Scientific Reports**, v. 6, p. 24052, 2016.
- Sloper, C. H. **The LED Grow Book**. 3. ed. S.l.: s.n., 2020. ISBN 9798645138097.
- Stark, G. **Light**. 2025. Encyclopædia Britannica. Acesso em: 11 set. 2025. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/light>>.

Sun, C. *et al.* Bifunctional regulators of photoperiodic flowering in short day plant rice. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1044790, 2022.

Sze, S. M.; Ng, K. K. **Physics of Semiconductor Devices**. 3. ed. Hsinchu, Taiwan / San Jose, California: Department of Electronics Engineering, National Chiao Tung University / Central Laboratory, MVC, 2007. 608–610 p.

Sá Júnior, E. M. **Estudo de estruturas de reatores eletrônicos para LEDs de iluminação**. Tese (Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/94480>>.

Teixeira, R. T. Distinct responses to light in plants. **Plants**, v. 9, n. 7, p. 894, 2020. Acesso em: 13 set. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/plants9070894>>.

Texas Instruments. **LM340, LM340A and LM7805 Family: Wide VIN 1.5-A Fixed Voltage Regulators**. 2016. Datasheet. Accessed: 2025-11-19. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm7805.pdf>>.

Venturas, M. D.; Sperry, J. S.; Hacke, U. G. Plant xylem hydraulics: What we understand, current research, and future challenges. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 59, n. 6, p. 356–389, 2017.

Vieira, I. d. C. **Projeto de um conversor Flyback auto-oscilante de baixo custo para LEDs de potência**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8CUGXG>>.

Wang, W. *et al.* Light intensity moderates photosynthesis by optimizing photosystem mechanisms under high vpd stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 205, p. 109322, 2024.

Wang, X. *et al.* **Cryptochrome-mediated light responses in plants**. 2014. Acesso em: 13 set. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801922-1.00007-5>>.

Weber, R. **Calculating an LED's Junction Temperature**. 2015. Mouser Electronics. Acesso em: 5 out. 2025. Disponível em: <<https://www.mouser.com/pdfdocs/Calculation%20of%20junction%20temperature.pdf>>.