

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Igor Gass Vegner

**METODOLOGIA DE PROJETO DE UM SISTEMA DE ILUMINAÇÃO
SUPLEMENTAR EM CONJUNTO COM PIVÔ DE IRRIGAÇÃO PARA
O CULTIVO DA SOJA**

Santa Maria, RS
2023

Igor Gass Vegner

**METODOLOGIA DE PROJETO DE UM SISTEMA DE ILUMINAÇÃO
SUPLEMENTAR EM CONJUNTO COM PIVÔ DE IRRIGAÇÃO PARA O CULTIVO
DA SOJA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Marco Antônio Dalla Costa, Dr. Eng.

Santa Maria, RS

2023

Informações Bibliográficas

Igor Gass Vegner

**METODOLOGIA DE PROJETO DE UM SISTEMA DE ILUMINAÇÃO
SUPLEMENTAR EM CONJUNTO COM PIVÔ DE IRRIGAÇÃO PARA O CULTIVO
DA SOJA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 16 de junho de 2023:

Marco Antônio Dalla Costa, Dr. Eng. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Paulo César Vargas Luz, Dr. Eng. (UFSM)
(Banca)

Pedro Santos Almeida, Dr. Eng. (UFJF)
(Banca)

Santa Maria, RS
2023

*Aos meus pais, Elsa e Odenir,
e a minha irmã, Alana.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, minha mãe Elsa, meu pai Odenir e minha irmã Alana, por todo o suporte durante a minha vida, servindo de inspiração para continuar perseguindo meus sonhos. Que algum dia eu possa retribuir tudo o que continuamente fazem por mim.

A minha esposa Bruna, pelos anos de companheirismo, pela consultoria constante em biologia e em bioquímica ao longo deste trabalho. Principalmente pela paciência e por diariamente me tornar uma pessoa melhor.

Ao professor Marco Antônio Dalla Costa, pela oportunidade de aperfeiçoamento acadêmico e pela confiança durante o desenvolvimento deste trabalho.

A banca examinadora, Paulo César Luz e Pedro Almeida, pela disponibilidade em avaliar este trabalho e pelas melhorias propostas a este.

Ao Matheus Righi, por estar sempre disposto a ajudar e pelos anos de amizade.

Inevitavelmente aos engenheiros, Giancarlo Daros, Guilherme Maschio, Matheus Righi, Miguel Martins, Leonardo Medeiros, Lucas Rocha, por alegrarem a jornada árdua da vida.

Aos amigos Alexandre Ferreira, Carlos Conrad, Denilson Soares e Eduardo Bitencourt pela parceria de longa data e por mostrar que a vida não é só trabalho.

Ao grupo GEDRE e aos professores do PPGEE da Universidade Federal de Santa Maria, pela contribuição neste e em diversos trabalhos. Um agradecimento especial para Guilherme Buriol por todo o empenho dispensado ao longo dessa jornada.

Ao NUPEDDEE por todo o suporte, pela infraestrutura e pela disponibilidade em auxiliar os discentes da UFSM.

Ao grupo Field Crops por todo o auxílio técnico e pelo compartilhamento de experiências interdisciplinares, em especial ao doutorando Darlan Barlest, ao professor Nereu Streck, ao professor Juliano Martins e ao professor Luciano Pes.

A Audax Electronics, por compreender que a pesquisa e o desenvolvimento acadêmico fazem parte da formação profissional de seus colaboradores e por gerar conexões valiosas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) pelo apoio financeiro dos projetos.

Por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e seguem contribuindo para um mundo melhor.

*All we have to decide is what to do
with the time that is given us.*

J.R.R. Tolkien

RESUMO

METODOLOGIA DE PROJETO DE UM SISTEMA DE ILUMINAÇÃO SUPLEMENTAR EM CONJUNTO COM PIVÔ DE IRRIGAÇÃO PARA O CULTIVO DA SOJA

AUTOR: Igor Gass Vegner

ORIENTADOR: Marco Antônio Dalla Costa

Este trabalho apresenta uma proposta de metodologia de projeto de sistemas de iluminação para horticultura, apresentando um contexto histórico da fisiologia vegetal, observando a influência da irradiação solar em cultivares da região sul do Brasil, como a soja. Com poucos estudos sobre o emprego de diodos emissores de luz em sistemas de agricultura, faz-se necessária a investigação do uso desses sistemas, apresentando as possíveis oportunidades dessa utilização. São apresentados os conceitos necessários para a construção da base do conhecimento no que se diz respeito a sistemas de agricultura com pivôs de irrigação, evidenciando os principais tipos, as vantagens e os desafios desses sistemas. Tal revisão é necessária para a compreensão do problema e para dimensionar sistemas de iluminação próprios para horticultura. Abordando variáveis radiométricas, os LEDs são pesquisados. Tendo como propósito o desenvolvimento de práticas de agricultura sustentáveis, motivam-se estudos e implementações de técnicas que atuam no incremento de produtividade de plantios ricos em nutrientes. O panorama do cultivo do grão de soja com a apresentação de métricas de produtividade na agricultura evidenciam um estudo multidisciplinar sobre a utilização de LEDs em sistemas de horticultura. São apresentados também os conceitos e as principais características desses dispositivos que justifiquem seu uso em sistemas agrícolas. A utilização de LEDs de elevada eficácia de fótons fotossintéticos, junto ao desenvolvimento de uma metodologia de projeto, viabiliza o uso de módulos de LED de potência como suplementação de luz aplicado à horticultura. A implementação de dois experimentos é realizada, utilizando o primeiro como uma prova de conceito, demonstrando os efeitos da iluminação artificial em plantios de soja durante o estágio vegetativo. Por fim, o segundo experimento é realizado utilizando a metodologia de projeto apresentada, durante a safra de soja no ano de 2021, numa zona rural disponibilizada pela Universidade Federal de Santa Maria, em parceria com o grupo Field Crops.

Palavras-chave: Diodos emissores de luz; radiometria; distribuição espectral de potência; LEDs para horticultura; radiação em comprimentos de onda específicos.

ABSTRACT

DESIGN METHODOLOGY FOR A SUPPLEMENTAL LIGHTING SYSTEM IN CONJUNCTION WITH IRRIGATION PIVOT FOR SOYBEAN CULTIVATION

AUTHOR: Igor Gass Vegner
ADVISOR: Marco Antônio Dalla Costa

This work presents a proposed methodology for designing lighting systems for horticulture, providing a historical context of plant physiology, and examining the influence of solar irradiation on cultivars in the southern region of Brazil, such as soybeans. With limited studies on the use of light-emitting diodes (LEDs) in agricultural systems, it is necessary to investigate the use of these systems and present the potential opportunities for their utilization. The necessary concepts for building the knowledge base regarding irrigation pivot agriculture systems are presented, highlighting the main types, advantages, and challenges of these systems. This review is essential for understanding the problem and sizing lighting systems suitable for horticulture. Addressing radiometric variables, LEDs are researched. With the aim of developing sustainable agricultural practices, studies and implementations of techniques that enhance the productivity of nutrient-rich crops are encouraged. The overview of soybean cultivation, with the presentation of agricultural productivity metrics, underscores a multidisciplinary study on the use of LEDs in horticulture systems. The concepts and key characteristics of these devices that justify their use in agricultural systems are also presented. The use of high-efficiency photosynthetic photon flux density LEDs, along with the development of a design methodology, enables the use of high-power LED modules as supplemental lighting for horticulture. The implementation of two experiments is carried out, with the first serving as a proof of concept, demonstrating the effects of artificial lighting on soybean crops during the vegetative stage. Finally, the second experiment is conducted using the presented design methodology during the soybean harvest in 2021, in a rural area provided by the Federal University of Santa Maria, in partnership with the Field Crops group.

Keywords: Light emitting diodes; radiometric characteristics; horticultural LEDs; spectral power distribution; specific wavelength emissions.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ilustração de um pivô de irrigação	32
Figura 2 – Espectro da irradiação solar na Terra.....	38
Figura 3 – Irradiação solar global com conjunto de dados delimitados ao Brasil.....	39
Figura 4 – Primeiros registros que correlacionam a ação de respiração com o espectro de absorção em plantas.....	41
Figura 5 – Pigmentos fotorreceptores encontrados em plantios diversos	42
Figura 6 – Curvas de: resposta quântica e resposta média das plantas.....	42
Figura 7 – Funcionamento dos fotossistemas.....	43
Figura 8 – Modelo de antena para reações de transferência de energia intermolecular	45
Figura 9 – Características do tecido vegetal	46
Figura 10 – Funcionamento da respiração a nível de tecido vegetal.....	47
Figura 11 – Conversão da energia solar em carboidratos.....	48
Figura 12 – Biociência da semente de soja	50
Figura 13 – Estágios de desenvolvimento do cultivar de soja.....	51
Figura 14 – Exemplo de estufa agrícola utilizando hidroponia em cultivares de alface	53
Figura 15 – Fábrica vertical no centro de São Paulo, Brasil	54
Figura 16 – Componentes gerais de um pivô central de irrigação	55
Figura 17 – Imagens de satélite evidenciando o uso de pivôs de irrigação em desertos.....	56
Figura 18 – Divisão das mesorregiões do Rio Grande do Sul.....	58
Figura 19 – Construção típica de LEDs de média potência (a) e de alta potência (b)	62
Figura 20 – Diferenças entre PC-LED e CM-LED	62
Figura 21 – Economia prevista para fontes de luz artificial do programa estadunidense em SSL	63
Figura 22 – Custo do LED ao longo do tempo em dólares por quilo-lúmen	64
Figura 23 – Comparativo entre CM-LED e PC LED da eficácia luminosa da fonte e da eficácia na conversão de potência.....	65
Figura 24 – Comparativo da capacidade de emissão de potência radiante entre PC-LED e CM-LED	65
Figura 25 – Comparativo entre a PAR e a curva de sensibilidade típica do olho humano	68
Figura 26 – Comparativo entre os tecidos condutores de um mesmo cultivo de alface submetido a luz com espectro estreito (a) e submetido a luz de espectro amplo (b)	70

Figura 27 – Eficiência óptica de LEDs comparados a distribuição espectral de potência (a) e ao fluxo de fótons fotossintéticos (b)	71
Figura 28 – Fluxograma da metodologia proposta.....	74
Figura 29 – Relatório de SPD no <i>software</i> HAAS-1200.....	76
Figura 30 – Representação do sistema plano C (a) e resultado óptico da lente CS16619_DAHLIA (b)	78
Figura 31 – Distribuição espacial de luz considerando uma luminária sem óptica auxiliar (esquerda) e uma luminária com óptica auxiliar VSM (direita).....	79
Figura 32 – Distribuição espectral de potência do LED Lumileds L1SP-PRP2002800000	80
Figura 33 – Dados radiométricos da fonte de luz artificial utilizada.....	80
Figura 34 – Diâmetro projetado na área irrigada.....	82
Figura 35 – Variáveis do pivô de irrigação	83
Figura 36 – Localização do experimento 1	86
Figura 37 – Resultado qualitativo do experimento 1.....	86
Figura 38 – Imagem aérea do plantio do experimento 2	87
Figura 39 – Demarcação das áreas do experimento 2	88
Figura 40 – Instalação da fonte de luz (a); luminária ligada no período noturno (b).....	89
Figura 41 – Evidências da mudança de estágios – R5 (a) e R8 (b) – do plantio no experimento 2	89
Figura 42 – Produtividade por grupos do experimento	90
Figura 43 – Aquisição dos dados elétricos de entrada e saída do sistema de iluminação	107
Figura 44 – Distribuição de intensidade luminosa da luminária	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de plantas de acordo com o método de fixação de carbono	49
Tabela 2 – Níveis alvo de eficácia luminosa para LEDs tipo PC e tipo CM.....	64
Tabela 3 – Divisão dos grupos em relação à suplementação e ao estágio de desenvolvimento	88
Tabela 4 – Parâmetros elétricos obtidos através da medição no osciloscópio	109
Tabela 5 – Parâmetros do pivô de irrigação disponibilizado para o experimento 2.....	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANSI	Instituto Nacional Americano de Padrões (do inglês <i>American National Standards Institute</i>)
CIE	Comissão Internacional de Iluminação (do francês <i>Commission Internationale de l'Éclairage</i>)
DIN	Instituto alemão de normas técnicas – <i>Deutsches Institut für Normung</i>
ESALQ	Escola Superior da Agricultura Luiz de Queiroz
GSA	Atlas global solar (do inglês <i>Global Solar Atlas</i>)
IAC	Instituto Agrônomo de Campinas – São Paulo
LEDs	Diodos Emissores de Luz (do inglês <i>Light Emitting Diodes</i>)
LS:17	17ª Conferência Internacional sobre Eficiência Energética em Fontes Domésticas e de Luz (do inglês <i>International Conference on Energy Efficiency in Domestic & Light Sources</i>)
PAR	Radiação fotossinteticamente ativa
PPE	Eficácia de fótons fotossintéticos
PPF	Fluxo de fótons fotossintéticos
SI	Sistema internacional de medidas
SPD	Distribuição Espectral de Potência (do inglês <i>Spectral Power Distribution</i>)
UN-DESA	Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas (do inglês <i>United Nations Department of Economic and Social Affairs</i>)
VLC	Do inglês <i>Visible Light Communication</i> , comunicação por luz visível

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
A_{em}	Área de submetida a radiação
A_T	Área total irrigada
D_P	Diâmetro do plantio experimentado
E	Energia
E_θ	Energia no ponto
E_r	Irradiância
f	Frequência
f_{MOT}	Frequência de operação do motor central
h	Altura livre entre torres
I_{IN}	Corrente de entrada
I_{OUT}	Corrente de saída
L_1	Primeiro lance
L_2	Segundo lance
L_{EC}	Alcance efetivo do canhão
L_N	Comprimento até a última torre
P_{MC}	Potência nominal do motor central
$PPFD_{1m}$	Densidade de fluxo de fótons fotossintéticos medidos a um metro da fonte de luz
$PPFD_{3m}$	Densidade de fluxo de fótons fotossintéticos medidos a três metros da fonte de luz
r_{EA}	Raio efetivo da área irrigada
RPM	Rotação nominal do motor central
v_2	Velocidade da última torre
V_{IN}	Tensão de entrada
V_{MOT}	Tensão nominal do motor central
V_{OUT}	Tensão de saída
Φ_e	Potência radiante
Φ_v	Fluxo luminoso

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	31
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	31
1.2	MOTIVAÇÃO	33
1.3	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	34
1.4	OBJETIVOS	35
1.5	SUMÁRIO DA METODOLOGIA PROPOSTA	35
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	35
2	FISIOLOGIA VEGETAL E SISTEMAS DE CULTIVO	37
2.1	FISIOLOGIA VEGETAL	37
2.1.1	Irradiação Espectral Solar	37
2.1.2	Fotossíntese	40
2.1.3	Classificação de Cultivos	48
2.1.4	Morfologia	49
2.2	SISTEMAS DE AGRICULTURA	53
2.2.1	Estufas	53
2.2.2	Fábrica de Plantas com Luz Artificial (PFALs)	54
2.2.3	Pivô de Irrigação	55
2.3	FIGURAS DE MÉRITO NA AGRICULTURA	56
2.4	PANORAMA DO CULTIVO DO GRÃO DE SOJA NO RIO GRANDE DO SUL	57
2.5	CONCLUSÕES PARCIAIS	59
3	DIODOS EMISSORES DE LUZ NA HORTICULTURA	61
3.1	ASPECTOS CONSTRUTIVOS	61
3.2	PANORAMA DA TECNOLOGIA	63
3.3	CARACTERÍSTICAS RADIOMÉTRICAS	66
3.3.1	Energia Radiante	66
3.3.2	Fluxo Radiante	66
3.3.3	Irradiância	66
3.3.4	Lei do Cosseno de Lambert	66
3.3.5	Distribuição Espectral de Potência	67
3.3.6	Resposta das Plantas à Luz	67
3.4	UTILIZAÇÃO DE LEDS NA HORTICULTURA	70
3.5	CONCLUSÕES PARCIAIS	71
4	METODOLOGIA DE PROJETO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PARA HORTICULTURA EM PIVÔS DE IRRIGAÇÃO	73
4.1	PASSOS PARA A DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO	73
4.1.1	Aquisição das Demandas Iniciais	75
4.1.2	Característica da Fonte De Luz	75
4.1.3	Definição da Distribuição Espectral de Potência	75
4.1.4	Tempo De Exposição E Integral De Luz Diária	76
4.1.5	Escolha dos LEDs	77
4.1.6	Determinação da Distribuição Espacial de PPF	77
4.1.7	Componentes e Equipamentos do Sistema	77
4.1.8	Caracterização da Distribuição Espacial da Luz	77
4.2	ESTUDO DE CASO	79
4.3	CONCLUSÕES PARCIAIS	83
5	EXPERIMENTOS DE VALIDAÇÃO	85

5.1	EXPERIMENTO 1 – SUPLEMENTAÇÃO 24 HORAS R5 – R8.....	85
5.2	EXPERIMENTO 2 – SUPLEMENTAÇÃO R5 – R8	87
5.3	CONCLUSÕES PARCIAIS	91
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	94
6.2	PRODUÇÃO CIENTÍFICA	95
	REFERÊNCIAS	97
	APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DA FONTE DE LUZ	107
	APÊNDICE B – CARACTERÍSTICAS DO PIVÔ DE IRRIGAÇÃO.....	110

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta as considerações gerais para esse trabalho, bem como a motivação para o estudo, com os objetivos almejados. É escolhida também a delimitação deste trabalho. Por fim, a divisão do trabalho é apresentada.

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O cuidado na oferta de alimentos aumenta com o crescimento populacional, com o aumento no consumo *per capita* e com a expansão das cidades nas próximas décadas (FAO, 2020). Estima-se que a população mundial cresça 25% até o ano de 2050, chegando a 9,7 bilhões de pessoas (UN-DESA, 2018). Nesse sentido, fazem-se necessárias investigações sobre como aumentar a produtividade em áreas de atividade agrícola (PAUCEK et al., 2020).

No Brasil, são produzidas cerca de 125 milhões de toneladas de soja anualmente e espera-se que sejam produzidos 139 milhões de toneladas do plantio na safra de 2022/2023 (USDA, 2022). A soja é um grão proteico e oleaginoso, com cerca de 40% de sua massa seca formada por proteínas e 20% formada por óleos (AGRIC, 2020).

Além disso, as áreas destinadas para o cultivo de grãos vêm diminuindo para entrar em conformidade com novas leis ambientais (SAATH; FACHINELLO, 2018). Sendo assim, a agricultura de precisão tem se tornado um tema amplamente estudado, pois cada vez mais se fazem necessários: a melhor utilização do solo, a redução da pegada de carbono e o enquadramento nas legislações ambientais (JIANG; MOALLEM, 2020).

Com diversos fatores a serem considerados nesse tipo de agricultura, os principais destaques são a identificação do solo, a quantificação de nutrientes e a atuação do produtor em características do ambiente em que o plantio está inserido (LI et al., 2021b). Dentre essas características, está a iluminação através da incidência solar na latitude em que o cultivar está sendo desenvolvido. Dessa forma, torna-se essencial o correto controle da exposição à iluminação, sendo possível complementar a luz solar em latitudes e épocas do ano em que a exposição diária não seja ideal ou abaixo do que determinado plantio necessita para o completo desenvolvimento (LI et al., 2021a).

Adicionalmente, a expansão da utilização de Diodos Emissores de Luz, ou LEDs, sigla em inglês para *Light Emitting Diodes*, influenciado pela melhoria da eficiência energética de sistemas de iluminação artificial, faz com que a aplicação dessa tecnologia seja investigada

também em sistemas de agricultura. Dado também que possuem características de cor customizável e elevada vida útil, robustez e eficácia luminosa, esses dispositivos se tornam uma alternativa competitiva aos sistemas de iluminação convencionais, compostos por lâmpadas de sódio de alta pressão (LEE; ELLIOTT; PATTISON, 2020).

A possibilidade de produzir plantios que outrora seriam incompatíveis com as condições climáticas específicas, como visto durante as quatro estações do ano, é um outro apelo tecnológico fornecido pelo uso de iluminação artificial e ambientes de cultivo controlados (ANPO; FUKUDA; WADA, 2018).

Outro fator a ser controlado em sistemas de agricultura é a irrigação. Para tal solução, pivôs de irrigação são comumente aplicados. Os pivôs de irrigação contribuem para a instalação rápida e simplificada de sistemas de iluminação a LEDs, possuindo uma estrutura metálica robusta, inicialmente necessária para o suprimento de água e para a melhor utilização da área do plantio (DEBAUCHE et al., 2018).

Conforme ilustrado na Figura 1, um pivô central possui um motor elétrico que provê a força necessária para a rotação do eixo, usualmente projetado para extensões a partir de 200 m a 2000 m, fornecendo a irrigação necessária durante o período noturno de até dez horas (AGRIVI, 2020).

Figura 1 – Ilustração de um pivô de irrigação



Fonte: Autor.

Para preservar os nutrientes que ditam o estado de conservação de determinado plantio, é necessário combinar ações de mapeamento e modificação genética, esterilização utilizando radiação no espectro ultravioleta, controle de solo, aferição de grandezas ambientais, trocas gasosas e controle da radiação solar (CARVALHO et al., 2022). Nesse sentido, é necessária a compreensão geral de temas da agricultura de precisão.

1.2 MOTIVAÇÃO

A redução de áreas de plantio eleva a busca por técnicas que visam o aumento de produtividade utilizando a mesma área já anteriormente demarcada para atividades agrícolas. O consumo energético de sistemas de suplementação, tanto de luz solar quanto de água, deve ser observado para fornecer soluções sustentáveis de aumento de produtividade, sendo alinhadas as normativas ambientais vigentes (PIVOTO et al., 2018).

Similarmente, o desperdício de alimento da colheita até a oferta ao consumidor final representa cerca de 30% do total de alimentos produzidos anualmente (UN, 2018). Com o aumento da temperatura global, a produtividade de diversos plantios diminui significativamente, exigindo o estudo de novas metodologias de cultivo, como: fazendas verticais, também nomeadas de fábricas de plantas com luz artificial, ou PFAL (do inglês *Plant Factories with Artificial Light*) (DUTTA GUPTA; AGARWAL, 2017) e sistemas de irrigação, como a irrigação com pivô central, ou CPI (do inglês *Center-Pivot Irrigation*) (AGRIVI, 2020).

O desenvolvimento da agricultura em ambientes remotos que contém biomas impróprios para o cultivo, motivam ainda mais estudos e implementações de técnicas que atuam na melhoria e no incremento de produtividade de plantios ricos em nutrientes. Alinhado à urbanização dos plantios, a automação das técnicas de plantio faz com que o desperdício de produtos seja reduzido, apesar de não representar diretamente o aumento da produtividade (FANCELLO; PADDEU; FADDA, 2017).

Além disso, com a expansão do uso da iluminação de estado sólido, surgem também soluções comerciais para a inclusão desses sistemas no meio agrícola. Tal influência é amplamente estudada pois estima-se que esses dispositivos atinjam 84% das instalações de iluminação em 2035 (PATTISON et al., 2019).

Denominadas de *Agrotechs*, empresas de tecnologia agrícola vem se tornando difusoras da tecnologia de iluminação de estado sólido (PINK FARMS, 2019). Com produtos que fornecem suplementação de luz solar, prometem aprimoramentos na produtividade em até 57% (SILVA, 2022).

No entanto, essas soluções não contemplam uma revisão aprofundada sobre a quantificação e a qualificação da fonte luz desses sistemas, sendo chamadas de maneira simplória de irrigação de luz (COMPRES RURAL, 2020). Por esse motivo, faz-se necessária a verificação desses resultados, apresentando as tecnologias disponíveis e metodologias propostas para o correto dimensionamento e experimentação de sistemas de iluminação para horticultura.

1.3 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Limita-se ao desenvolvimento de sistemas de iluminação em pivôs de irrigação, sendo esse o principal sistema de cultivo estudado no trabalho. Para tal, apresenta-se e define-se as características necessárias de entradas e saídas de projeto, como a potência elétrica, a distribuição espacial, a distribuição espectral de potência radiante, o tempo de exposição do plantio à radiação emitida pela fonte de luz, entre outros.

Este trabalho, porém, não tem a intenção de desenvolver um novo circuito de acionamento para emissão de luz artificial. No entanto, os efeitos da radiação solar e da radiação artificial no cultivo do grão de soja são analisados considerando as características do bioma da região Sul do Brasil.

Por se tratar de um trabalho multidisciplinar, envolvendo as áreas de sistemas eletrônicos de iluminação e fisiologia de plantas, duas equipes são responsáveis pelo seu desenvolvimento. A Equipe Field Crops é responsável pela definição da demanda inicial do cultivo e por determinar quanto o sistema de iluminação projetado deve fornecer de luz adicional para o plantio, assim como a obtenção e avaliação de resultados dos experimentos realizados.

Já a Equipe GEDRE é responsável pelo projeto do sistema de iluminação. Deste modo, este trabalho é limitado ao dimensionamento das luminárias a serem utilizadas, especificando-as em grandezas como: potência elétrica, distribuição espectral de energia, óticas auxiliares. Bem como a avaliação das grandezas radiométricas, a montagem e programação do sistema de iluminação utilizando os pivôs de irrigação como suporte.

Embora seja possível a utilização de LEDs em espectros distintos, como ultravioleta e infravermelho para aplicações como tratamento de mudas e manipulação genética, a presente dissertação não aborda esse tema. Neste trabalho é proposta uma metodologia de projeto da fonte de luz para suplementação da luz solar com base em premissas coletadas pela equipe de agronomia, específicas para o plantio de soja, apesar de ser possivelmente replicável para outros plantios.

1.4 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal o estudo e o desenvolvimento de sistemas de iluminação para suplementação de luz em cultivos de soja irrigados com pivô central. É estabelecida uma metodologia de projeto que identifica os principais conceitos e variáveis necessárias, fornecendo as saídas de projeto para que sejam identificados os efeitos da suplementação luminosa do plantio durante uma safra de soja.

Também é feita a modelagem de sistemas de iluminação levando em conta a dosagem de luz, figura de mérito utilizada no aumento da integral diária de luz e no possível encurtamento do período da colheita. Por meio de um estudo de caso, é possível realizar a validação de uma metodologia de projeto onde o cultivo de soja é submetido a iluminação artificial suplementar ao longo de seu desenvolvimento fisiológico.

Como objetivo secundário, faz-se necessária a comparação de resultados encontrados em notícias do meio rural sobre a comercialização de sistemas de iluminação para o incremento da produção de soja. Tal fato muitas vezes divulgado extensivamente de forma a oferecer soluções de fertilizantes em pacotes comerciais que fornecem supostamente incrementos na produtividade de qualquer cultivo.

1.5 SUMÁRIO DA METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia é dividida em seis etapas, sendo mais bem ilustrada na Figura 28 do Capítulo 4 deste trabalho. Resumidamente, têm-se:

- Aquisição das demandas iniciais;
- Definição da característica de distribuição espectral de energia;
- Aquisição do tempo de exposição diária com base na estrutura do pivô;
- Estimativa de integral diária de luz suplementar;
- Projeto do sistema de iluminação com os componentes disponíveis;
- Validação do sistema de iluminação por meio de experimentação.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação possui seis capítulos, sendo este o primeiro.

O capítulo dois apresenta os principais aspectos dos sistemas de horticultura, como: tipos de solo, classificação de cultivos, quantificação da luz e ambiência. Além disso, são apresentados tópicos sobre fisiologia vegetal, os métodos para estimulação de fotossíntese e as características da fonte de emissão.

No capítulo três, é apresentada a utilização de Diodos Emissores de Luz – na sigla em inglês, *LEDs* – em diversos ramos, demonstrando os avanços da tecnologia desses dispositivos e suas aplicações em horticultura. Também são apontados os conceitos da fotometria e da radiometria, correlacionando grandezas medidas que são utilizadas para iluminação centrada ao ser humano e que neste trabalho são derivadas para grandezas que meçam os efeitos da iluminação centrada em plantas.

Já no capítulo quatro, é apresentada a metodologia de projeto radiométrico. É mostrado um conjunto de passos e de decisões a serem tomadas, à medida que o ambiente é caracterizado. Tendo esse desenvolvimento estabelecido, torna-se possível a definição de um experimento para validação da suplementação de luz solar durante a safra de soja.

É mostrada a realização dos experimentos, bem como os resultados obtidos, no capítulo cinco. Neste são apresentados os componentes utilizados para evidenciar figuras de mérito para horticultura, como produtividade em número de sacas de soja por hectare e a dosagem de luz artificial utilizada para incrementar a integral de luz diária do plantio de soja.

Por fim, o capítulo seis apresenta as conclusões deste trabalho, bem como a produção científica decorrente do estudo e sugestões para desenvolvimentos futuros.

2 FISILOGIA VEGETAL E SISTEMAS DE CULTIVO

Este capítulo tem como objetivo mostrar a evolução e o estado da arte de sistemas de agricultura, principalmente no que se diz respeito ao efeito da luz em cultivares. São apresentados os aspectos de fisiologia vegetal necessários para a compreensão do tema, construindo a base de pensamento para a apresentação da metodologia de projeto. Características dos sistemas de agricultura, juntamente com a classificação de conceitos estudados também estão presentes.

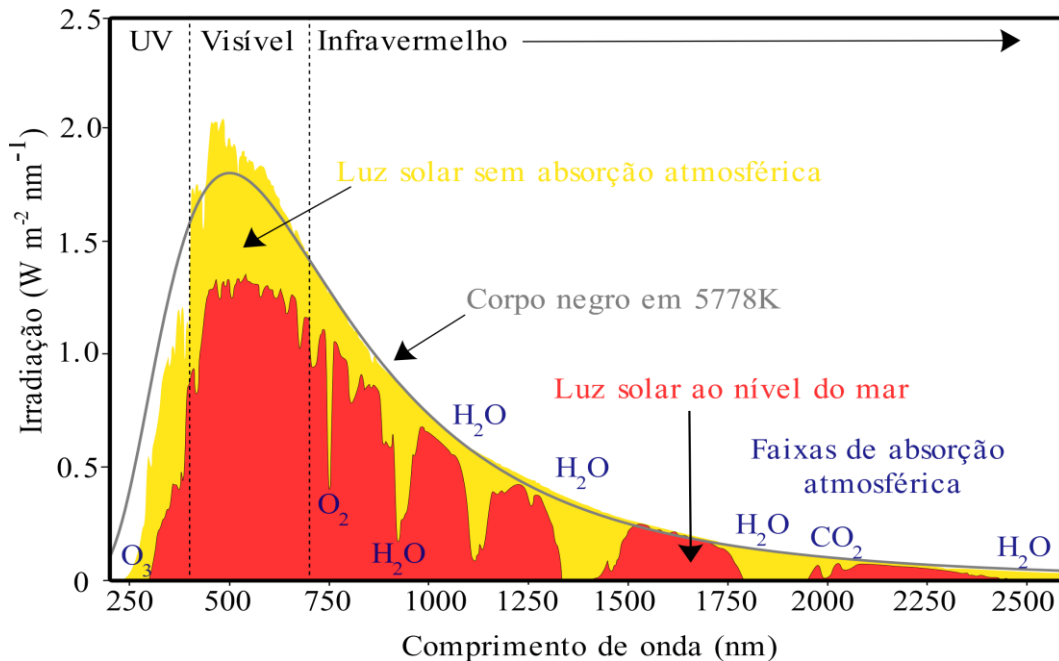
2.1 FISILOGIA VEGETAL

Faz-se necessária a identificação dos principais parâmetros que serão utilizados como entradas de projeto durante a apresentação da metodologia, possibilitando a compreensão de temas como a morfologia do plantio e a construção dos fotorreceptores. Esses fatores são fundamentais para a correta especificação da distribuição espectral de energia do sistema de iluminação proposto. É mostrado, a seguir, os fundamentos utilizados no trabalho.

2.1.1 Irradiação Espectral Solar

O termo irradiação refere-se ao ato de um determinado corpo transmitir energia em forma de radiação eletromagnética. A irradiância é a emissão de ondas eletromagnéticas em um meio, com a unidade definida no SI como Watts por metro quadrado ($W m^{-2}$). A Figura 2 mostra a emissão de radiação do sol sem considerar a absorção atmosférica e a emissão de radiação do sol considerando a absorção atmosférica ao nível do mar em amarelo e vermelho, respectivamente (ROBERT A. ROHDE).

Figura 2 – Espectro da irradiação solar na Terra



Fonte: Autor, adaptado de (ROBERT A. ROHDE).

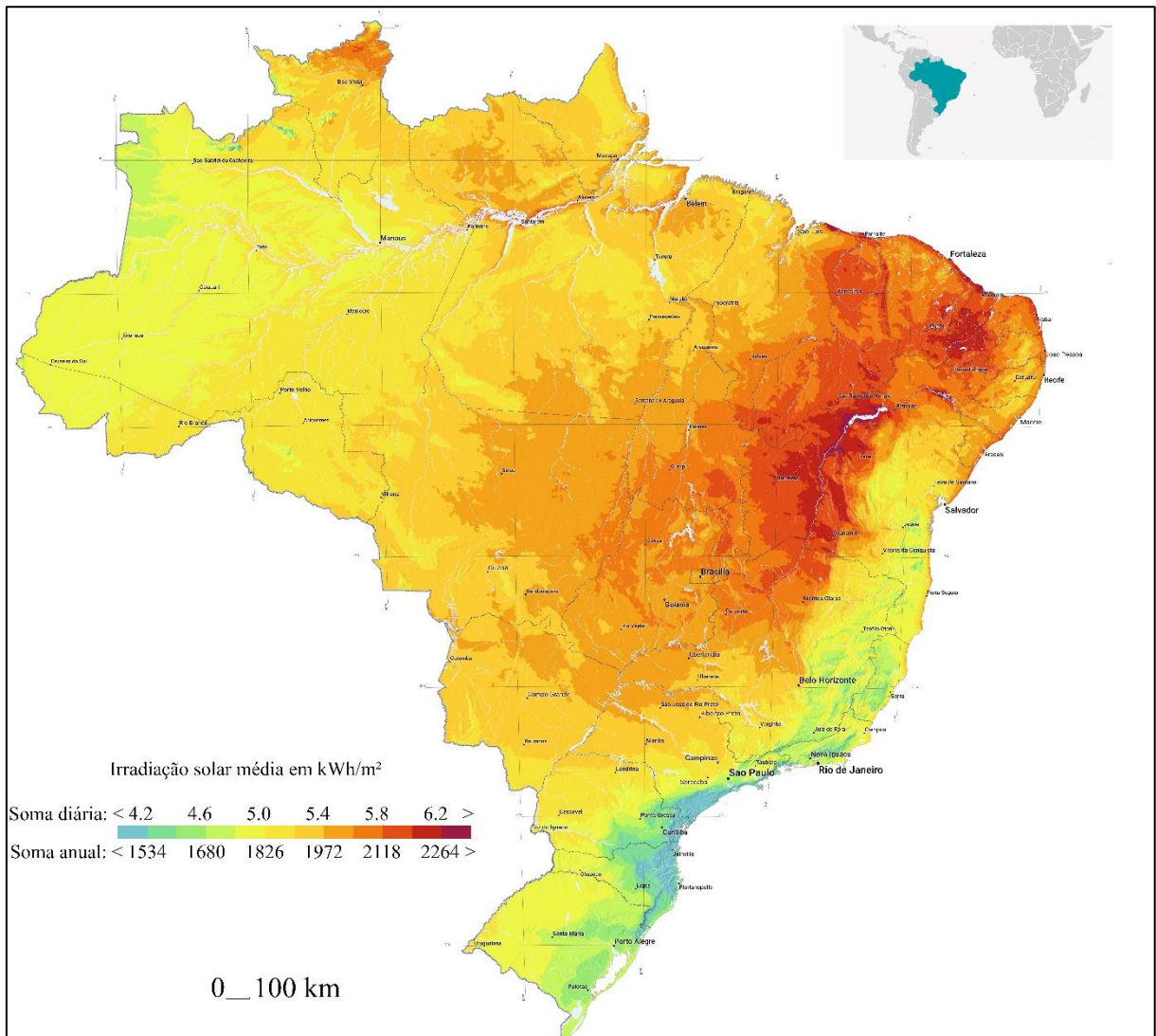
A irradiação solar se compreende a diversos comprimento de onda, dividindo-se ao longo de espectros de luz visível a olho humano e espectros não visíveis, com faixas de irradiação mensuráveis entre 200nm até 2600nm. Já o índice de irradiação global horizontal, GHI, do inglês *Global Horizontal Irradiance*, representa a radiação total do sol no Brasil, depois de perdas por difusão da atmosfera, ilustrado na Figura 3 (GSA, 2022).

Dentre os espectros de radiação emitida, é comum denominar as faixas de acordo com o comprimento de onda, por exemplo: 200nm a 400nm – ultravioleta; 400 a 480 nm – azul; 480 nm a 580 nm – verde; 580 nm a 630 nm – amarelo; 630 nm a 650 nm – laranja; 650 nm a 700 nm – vermelho; 700 nm a 730 nm – vermelho distante; acima de 730 nm – infravermelho (TAIZ; ZEIGER, 2007).

2.1.1.1 Curva de radiação fotossinteticamente ativa

Também chamada de PAR, do inglês, *Photosynthetically Active Radiation*, denota a região na qual é feita a absorção de energia por fotorreceptores presentes em seres vivos baseados em clorofila (PARK; RUNKLE, 2017). Define-se essa região começando com uma absorção normalizada de 400 nm a 700 nm (SHAIRESH, 2019).

Figura 3 – Irradiação solar global com conjunto de dados delimitados ao Brasil



Fonte: Adaptado de (GSA, 2022).

2.1.1.2 Integral de luz diária

Representada pela sigla em inglês, DLI, a *Daily Light Integral* representa a soma total da luz recebida em forma de PAR ao longo de um dia. Nesse sentido, é um parâmetro medido em função da densidade de fluxo de fótons fotossintéticos, expresso em $\mu\text{mol s}^{-1}\text{m}^{-2}$ em um período equivalente a um dia, sendo expresso comumente em $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (TORRES; LOPEZ, 2010). A Equação (1) apresenta o cálculo de DLI, onde t_{luz} representa o tempo de exposição diária de luz, realizando a conversão da densidade de fluxo fotossintéticos para mol , resultando assim em um valor de DLI expresso em $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

$$DLI = \frac{PPFD}{10^6} t_{\text{luz}} * 3600 \quad (1)$$

O aumento da DLI pode proporcionar o encurtamento dos estágios de vida dos plantios e a colheita adiantada destes sem que haja perda de produtividade (DORAIS, 2003). Já um valor de DLI inferior tipicamente reduz o desenvolvimento e o crescimento de plantios, conforme estudos que aferem a massa seca da raiz da planta (HARUN et al., 2013) (LOPEZ; RUNKLE, 2008) .

Por exemplo, uma DLI de $13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ é necessária para a produção de alface (CHEN et al., 2015). Além disso, com o gráfico de irradiação solar, apresentado na Figura 3, torna-se possível a obtenção da DLI de uma determinada região da terra – nesse caso do Brasil – com as devidas considerações na correlação dos conceitos da fotometria com os da radiometria.

2.1.2 Fotossíntese

Nessa seção é demonstrada como é feita a transferência da energia solar em energia química, por meio da síntese proteica que origina o termo fotossíntese. Mostra-se de forma resumida como os fotossistemas realizam a síntese de Adenosina Trifosfato, ATP, através da Adenosina Bifosfato, ABP. Além disso, é apresentado o modelo de excitação de elétrons por meio das moléculas dos pigmentos que agem como antenas para captação da energia solar. Por fim, é possível determinar de forma geral a eficiência de sistemas de fotossíntese.

2.1.2.1 Luz como partícula

Segundo a teoria quântica, a radiação é absorvida ou emitida por um corpo aquecido não sob a forma de ondas, mas por meio de pequenos pacotes de energia, ou *quantum*. Com fótons sendo quantidades, ou *quanta*, de luz (RITZ; DAMJANOVIĆ; SCHULTEN, 2002).

Nos organismos fotossintéticos, a energia dos fótons de luz é utilizada para a síntese de ATP. Essa absorção é realizada por pigmentos fotossintéticos localizados nas membranas dos tilacoides, em especial as clorofilas. A energia, dada em Joules, de um fóton em função do comprimento de onda é dada pela Equação (2), onde h é a constante de Planck ($6,626 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}^{-1}$), c é a velocidade da luz e λ (m s^{-1}) o comprimento de onda (m) observado (ASHDOWN, 2015).

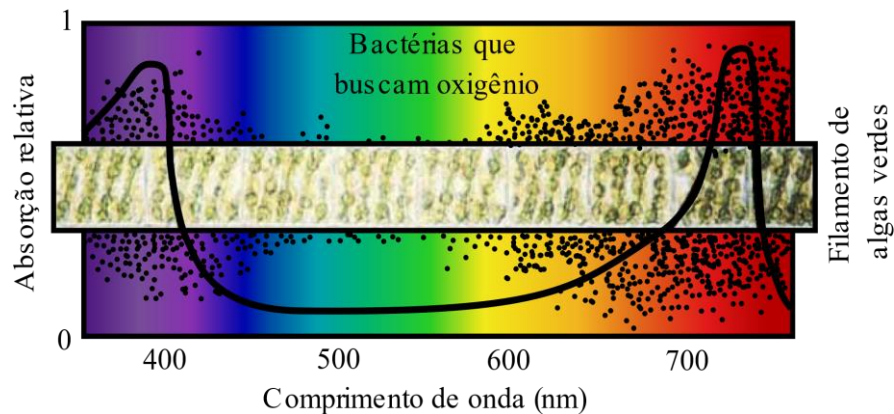
$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

2.1.2.2 Fotorreceptores

A fotossíntese ocorre em duas etapas. Primeiro, a energia luminosa é absorvida pelos pigmentos fotossintéticos e conservada na forma de ATP e NADPH, e o oxigênio é produzido. Essa etapa, que é similar à fosforilação oxidativa das mitocôndrias, é denominada de fase luminosa ou fotofosforilação. Na etapa seguinte, chamada de fixação do carbono, o ATP e o NADPH são usados para reduzir dióxido de carbono para formar trioses fosfato, glicose, amido, sacarose e outros derivados (NELSON; COX, 2014).

Experimentos realizados no final do século 19 revelaram a resposta do espectro de ação da fotossíntese em algas filamentosas *Spirogyra*. Tal característica foi observada ao utilizar um medidor de gás oxigênio para detectar a respiração celular desses seres, conforme mostra a Figura 4 (RAVEN et al., 2005).

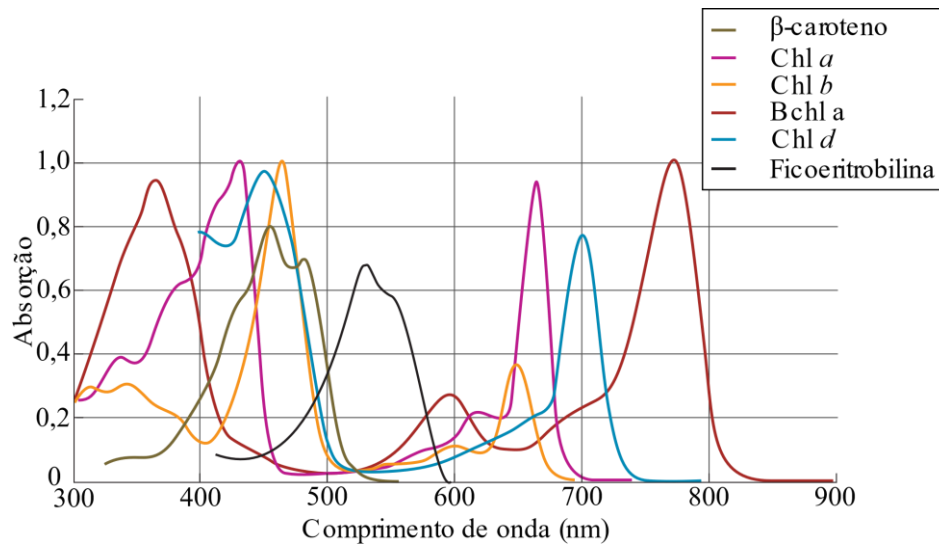
Figura 4 – Primeiros registros que correlacionam a ação de respiração com o espectro de absorção em plantas



Fonte: Adaptado de (RAVEN et al., 2005).

Além disso, por meio de experimentos, é reconhecido que os principais pigmentos fotossintéticos são as clorofilas a e b, os carotenóides e as ficobilinas, também chamados de fotorreceptores (CONNOR; LOOMIS; CASSMAN, 2011). O espectro de absorção de energia em função do comprimento de onda é mostrado na Figura 5.

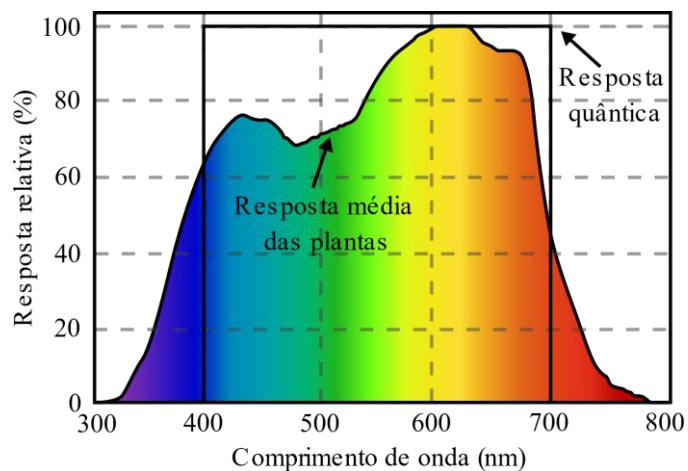
Figura 5 – Pigmentos fotorreceptores encontrados em plantas diversos



Fonte: Adaptado de (TAIZ; ZEIGER, 2007).

Tendo esses experimentos como um sistema replicável em outros cultivares, logo foi proposta a curva de McCree, em 1971, mostrando a resposta média de absorção das plantas com em relação a esses fotorreceptores, conforme a Figura 5 (MCCREE, 1971). Essas medições foram observadas através do nível de absorção de gás carbônico (CO_2) em 22 espécies de plantas, ao longo dos comprimentos de onda de 350nm a 750nm (MCCREE, 1971). Dessa forma, utilizou-se do espectro de absorção com o nível de excitação quântica para padronizar o conceito junto a institutos certificadores e emissores de normas técnicas, conforme mostra a Figura 6 (DIN, 2018).

Figura 6 – Curvas de: resposta quântica e resposta média das plantas



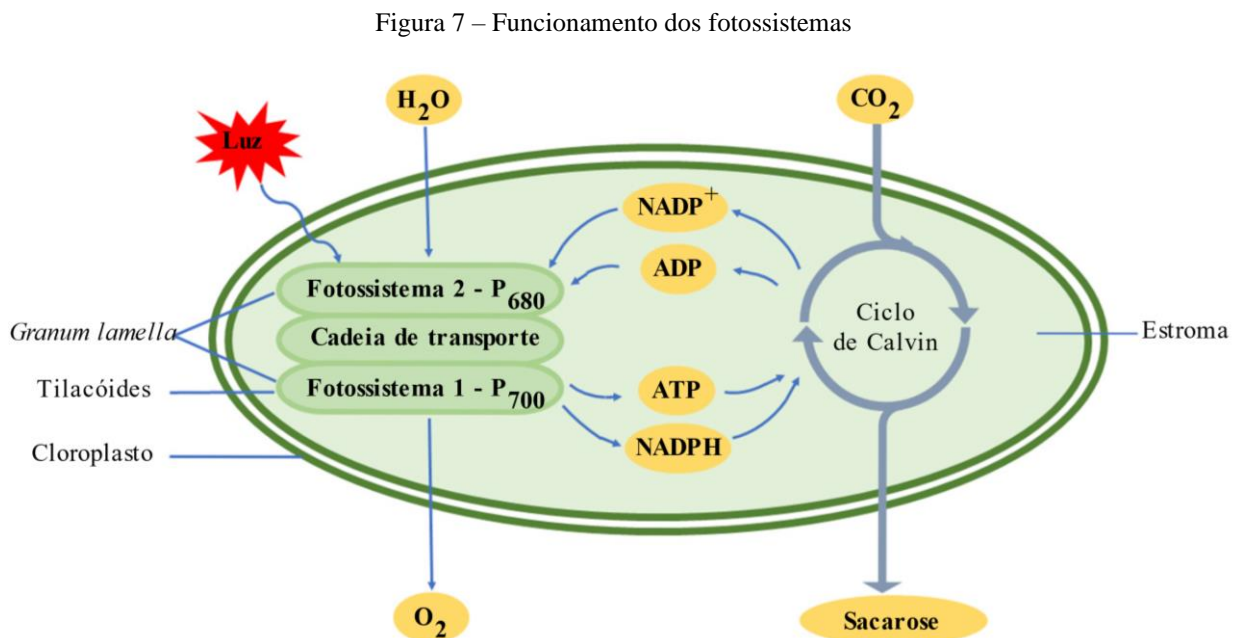
Fonte: Adaptado de (DIN, 2018).

2.1.2.3 Fotossistemas

As plantas são organizadas e gerenciadas nos cloroplastos, considerado o núcleo onde é feita a síntese da matéria orgânica, agindo como uma fábrica de material biológico (GAN et al., 2019). Conforme a Figura 7, o cloroplasto possui dois fotossistemas: P₆₈₀ e P₇₀₀ (RAVEN et al., 2005).

Esses sistemas são responsáveis pelos sinais de abertura e fechamento de estômatos, pela liberação de enzimas que utilizam a energia solar e o complexo de nutrientes para produzir e fixar o carbono conforme o ciclo de Calvin (RAVEN et al., 2005). A absorção de luz ambiente é feita no fotossistema I (ou P₆₈₀). Já no fotossistema II (ou P₇₀₀) ocorre a produção de oxigênio, também chamada da fase em que ocorre o sequestro de gás carbônico no ambiente (BLANKENSHIP, 2021).

Os dois fotossistemas atuam em sequência para catalisar o movimento dos elétrons da água, impulsionados pela radiação, para o NADP⁺, formando NADPH. Para substituir os elétrons que se movem de P₇₀₀ através de P₆₈₀ para o NADP⁺, as plantas oxidam a H₂O, produzindo O₂, realizando a fotossíntese oxigenada (NELSON; COX, 2014).



Fonte: Adaptado de (GAN et al., 2019).

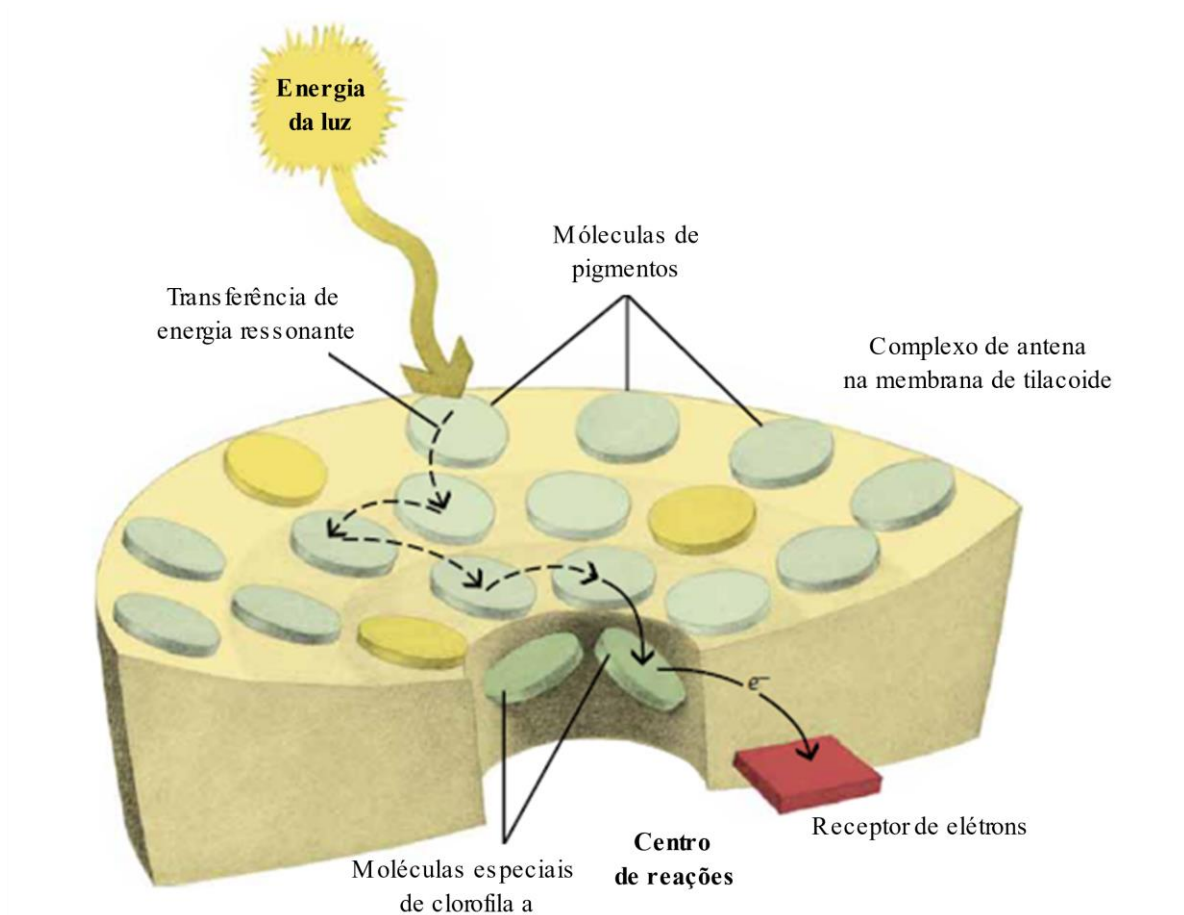
2.1.2.4 *Fixação de Carbono*

As plantas e microrganismos fotossintetizantes podem produzir carboidratos utilizando CO_2 e H_2O . O CO_2 , a fonte de carbono, é reduzido pelo emprego da energia fornecida pelo ATP e do poder redutor do NADPH, ambos gerados das reações dependentes de luz. De acordo com o modelo de antena para reações de transferência de energia entre as moléculas dos pigmentos, é possível realizar a fixação de carbono por meio do Ciclo de Calvin, conforme mostra a Figura 8 (RAVEN et al., 2005).

A conversão do CO_2 em compostos orgânicos (glicose, sacarose, amido, celulose, lipídios, proteínas, etc.) é realizada por um maquinário enzimático localizado no estroma do cloroplasto em um processo denominado assimilação do carbono (TAIZ; ZEIGER, 2007). Este processo é feito em nível celular, mas pode ser observado também nos tecidos vegetais, que agem como paredes respiratórias, contendo estômatos.

Esses, por sua vez, são utilizados para trocas gasosas, onde é absorvido o gás carbônico, CO_2 , e liberado o gás oxigênio, O_2 (C C BLACK, 2003). Quando não há a troca gasosa, atuam também como células-guarda, captando e mantendo os nutrientes sintetizados.

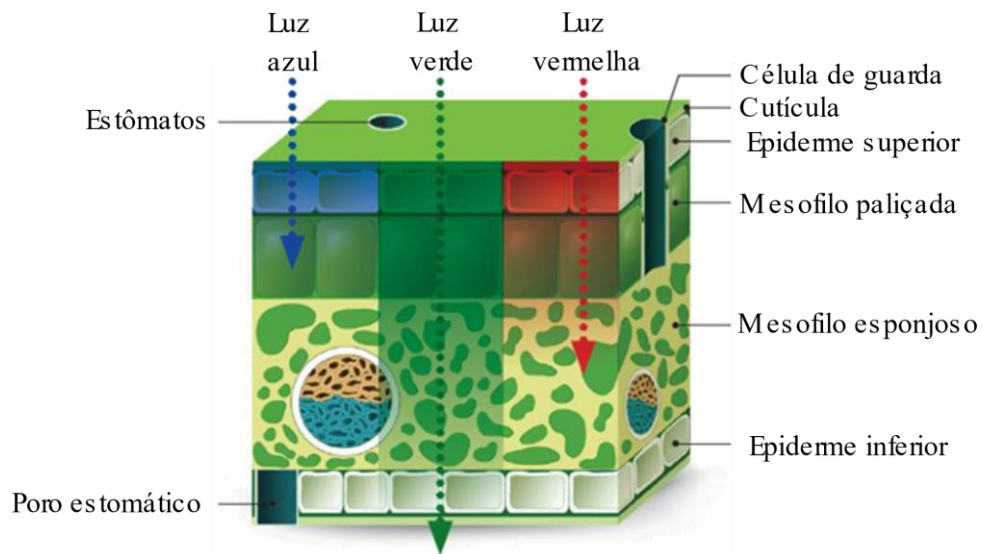
Figura 8 – Modelo de antena para reações de transferência de energia intermolecular



Fonte: Adaptado de (RAVEN et al., 2005).

A Figura 9 mostra a estrutura padrão do tecido, composto pela epiderme e mesófilos superior e inferior (CHEN et al., 2015). Apesar de não excitar a ativação dos fotossistemas como a luz azul e a luz vermelha, a luz verde pode penetrar além da epiderme inferior, aumentando a produção de tecidos condutores. Esses tecidos, por sua vez, atuam como proteções e proveem reforço das estruturas do plantio.

Figura 9 – Características do tecido vegetal



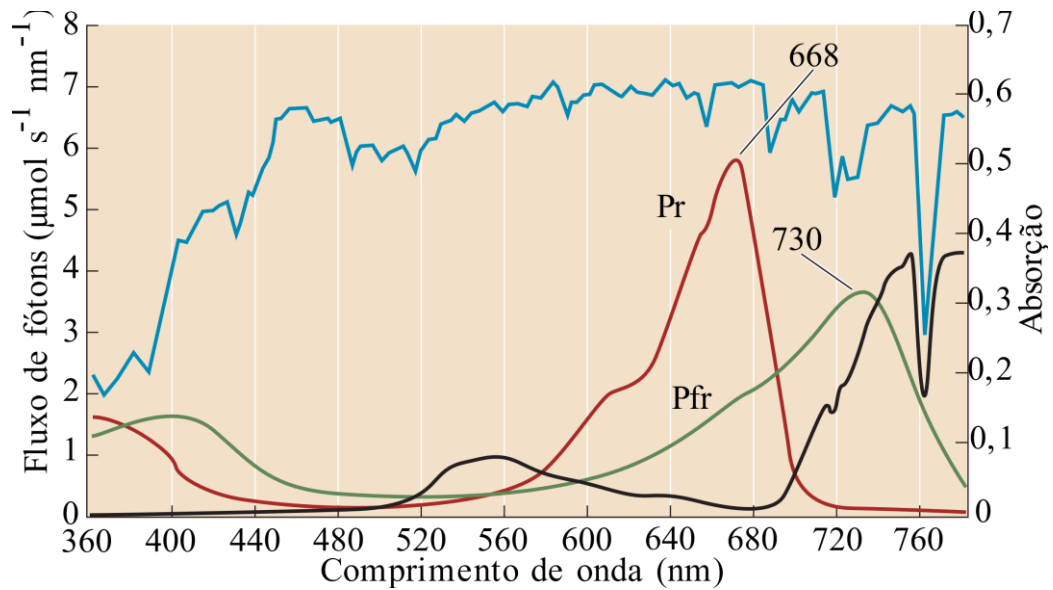
Fonte: Adaptado de (CHEN et al., 2015).

2.1.2.5 Fotoperiodismo

Plantas têm a capacidade de distinguir a luz do dia e a luz da noite. Essas, por sua vez, utilizam essa informação para iniciar ou encerrar processos como a frutificação, a dormência e a abertura de estômatos para respiração celular (HART, 1988). Esses estímulos são detectados pelos fitocromos vermelho (P_r) e vermelho distante (P_{fr}), responsáveis por comandar ações de germinação de sementes e pela inibição da germinação de sementes, respectivamente (PARK; RUNKLE, 2017).

Esses fotorreceptores desencadeiam funções metabólicas similares ao ciclo circadiano dos seres humanos. Nesse caso, informando ao plantio para realizar ou não respiração celular (GARDNER et al., 2006). Possuindo comprimento de onda dominantes em 668nm e em 720nm, vermelho e vermelho distante, respectivamente, conforme mostra a Figura 10 (TAIZ; ZEIGER, 2007).

Figura 10 – Funcionamento da respiração a nível de tecido vegetal



Fonte: (TAIZ; ZEIGER, 2007).

2.1.2.6 Fototropismo

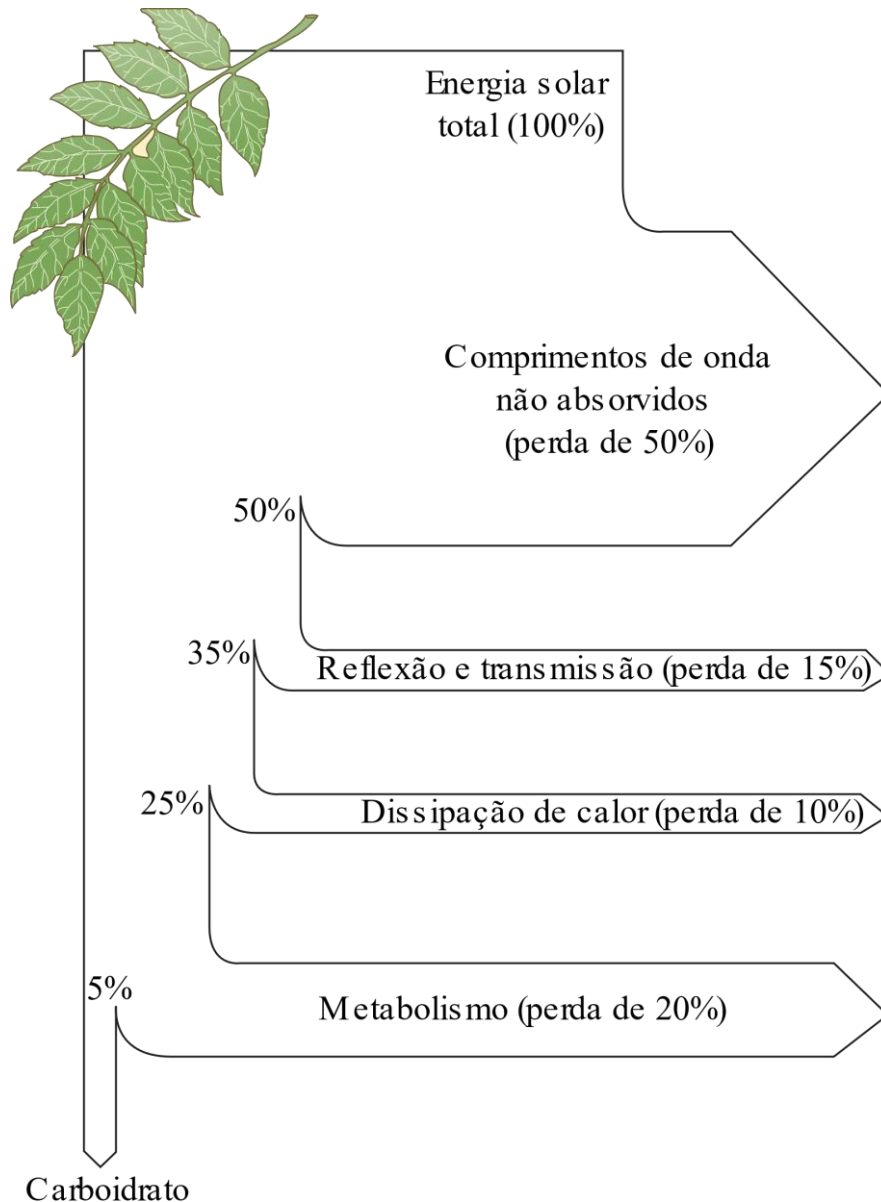
Consiste nos estímulos fisiológicos do cultivo em criar tecidos para se aproximar da fonte de energia luminosa (LI et al., 2019). Baixos níveis de radiação na região quântica podem resultar no estiolamento da planta, ou seja, no acréscimo de altura do caule sem que haja aumento na produção de biomassa, de forma ao plantio sobreviver sob condições adversas a produção e fixação de carbono em forma de açúcares (RUNKLE; HEINS, 2001).

2.1.2.7 Eficiência da conversão de energia solar

A anatomia das folhas é altamente especializada para a absorção de luz, tendo a camada celular mais externa, a epiderme, transparente à luz visível (TAIZ; ZEIGER, 2007). Mesmo assim, grande parte da irradiação solar é composta por espectros não absorvidos pelas plantas e partes que são refletidas, gerando estímulos de sobrevivência nos plantios.

Onde o cultivo age na preservação dos nutrientes e na decisão de realizar as funções metabólicas, produzindo biomassa, ou de hibernar de forma a preservar o estado atual dos nutrientes e sobreviver em condições adversas (TAGLIAPIETRA et al., 2021). Nesse sentido, mostra-se na Figura 11 a conversão percentual da energia solar total em carboidratos.

Figura 11 – Conversão da energia solar em carboidratos



Fonte: (TAIZ; ZEIGER, 2007).

2.1.3 Classificação de Cultivos

Os cultivos podem ser classificados de diversas maneiras. Nesta seção, são classificados quanto a processos químicos de fixação de carbono e a morfologia básica. Fatores como qualidade do solo, sistemas de absorção de água e sais minerais não serão abordados no presente documento, conforme a limitação do projeto apresentada na seção 1.3. Para uma abordagem mais ampla sobre o tema, pode-se referenciar o sistema brasileiro de classificação de solos (Portal Embrapa, 2022).

É possível se referir a essa classificação de como o carbono é fixado nos diferentes tipos de metabolismo celular, seguindo os três tipos especificados na Tabela 1. Conforme (RAVEN et al., 2005), sendo:

- Caminho C3: metabolismo que faz ligações utilizando três carbonos;
- Caminho C4: metabolismo que faz ligações de quatro carbonos;
- Caminho CAM: metabolismo que faz as ligações de carbono através do ácido crassuláceo, presente em plantas com frutos

Tabela 1 – Tipos de plantas de acordo com o método de fixação de carbono

Tipo	Fixação de CO ₂ e Ciclo de Calvin	Estômatos abertos	Ambientes de melhor adaptação
C3	Nenhuma separação	Dia	Frios e úmidos
C4	Entre mesófilos e células da bainha vascular (separação espacial)	Dia	Quentes e ensolarados
CAM	Separação temporal (dia e a noite)	Noite	Muito quentes e secos

Fonte: Adaptado de (HART, 1988).

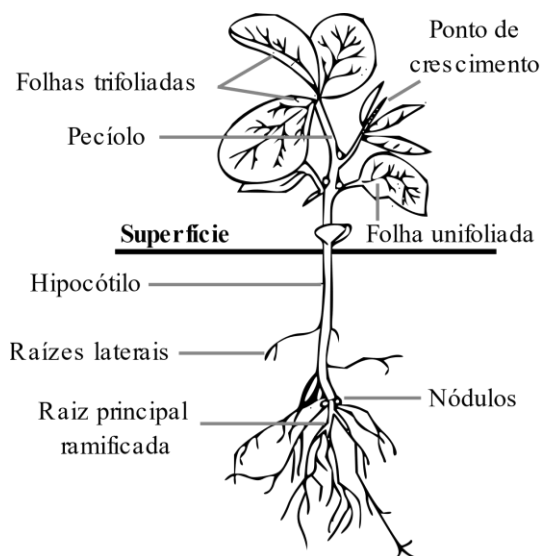
Plantios comuns aos grupos são: Soja, tipo C3, produzindo óleos característicos da não separação na fixação de CO₂ e do ciclo de Calvin; Cana-de-açúcar, tipo C₄, construtivamente com a fixação de CO₂ ocorrendo em mesófilos e o ciclo de Calvin nas células da bainha vascular; abacaxi, tipo CAM, que separa sazonalmente dependendo do estágio de vida e época do ano, produzindo ou não frutos (TAIZ; ZEIGER, 2007)

A sazonalidade dos cultivos pode ser determinada por diversos fatores. Porém, o caminho de carbono quatro é uma das soluções para a fotorrespiração. Para o caso de plantas CAM, essa fixação é feita fora das células principais, gerando a sazonalidade dos plantios, realizando o metabolismo do ácido crassuláceo somente quando geram frutos (CONNOR; LOOMIS; CASSMAN, 2011).

2.1.4 Morfologia

Tem como função principal observar características construtivas e de funcionamento dos cultivares. Subconjuntos como a raiz, os nódulos, o hipocótilo, o pecíolo e as folhas fazem parte da estrutura vista ao longo do desenvolvimento do plantio. A Figura 12 mostra um exemplo de como é essa estrutura dos plantios de soja.

Figura 12 – Biociência da semente de soja



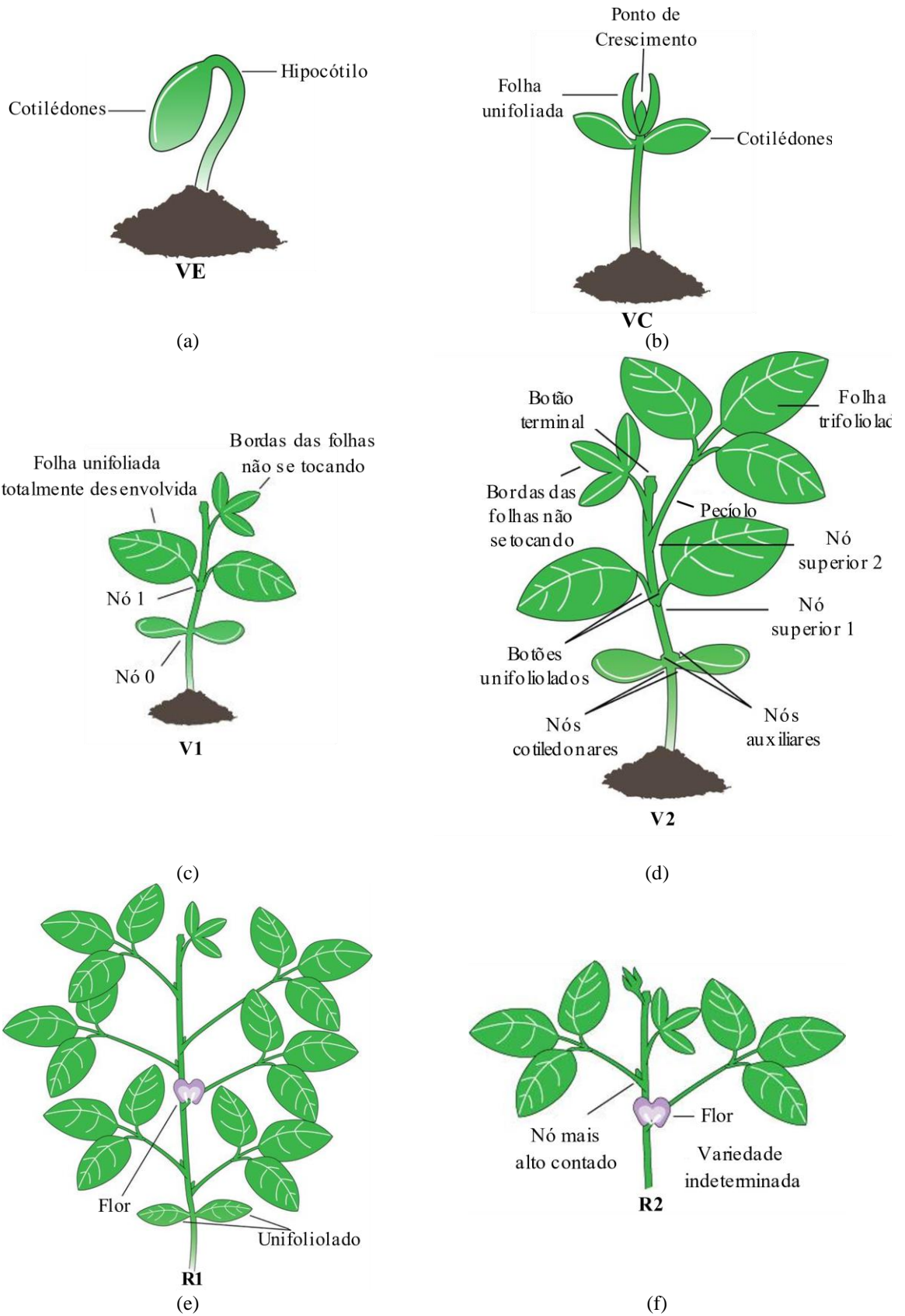
Fonte: Autor, adaptado de (SERVICE, 1962).

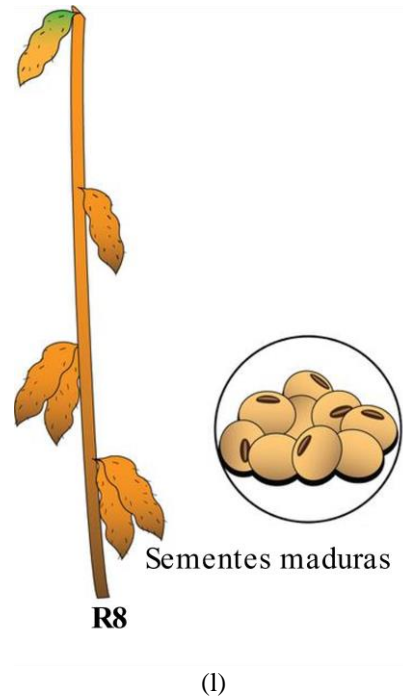
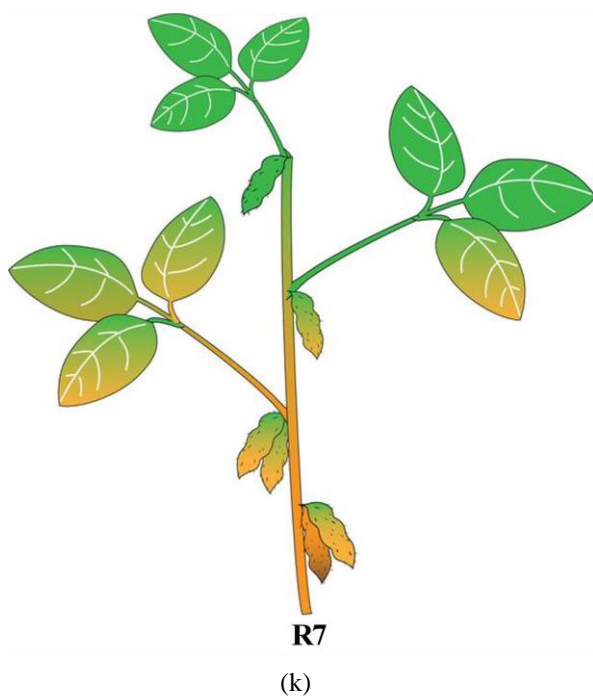
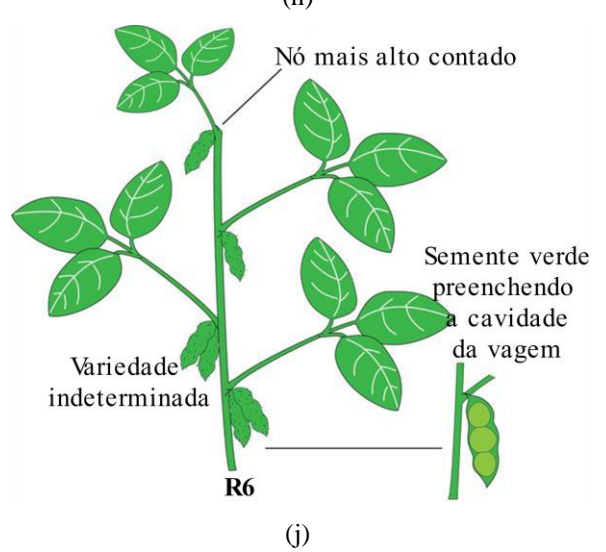
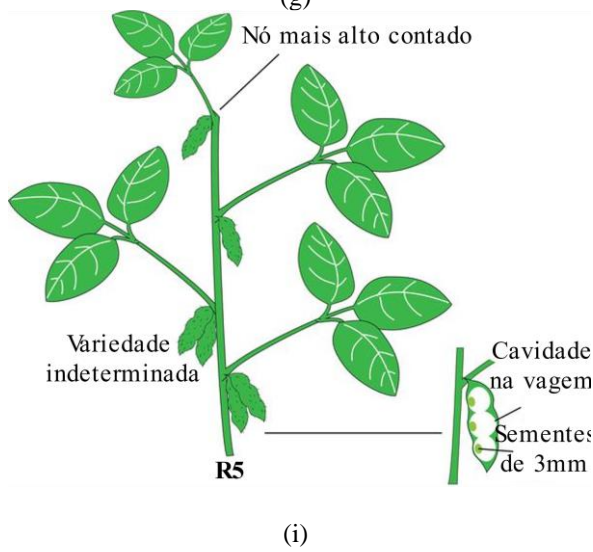
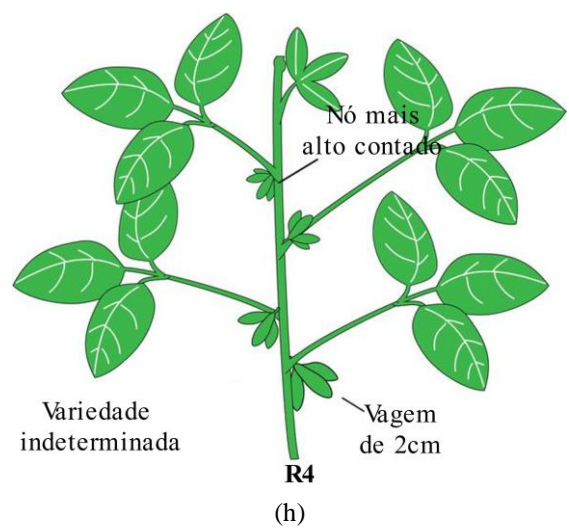
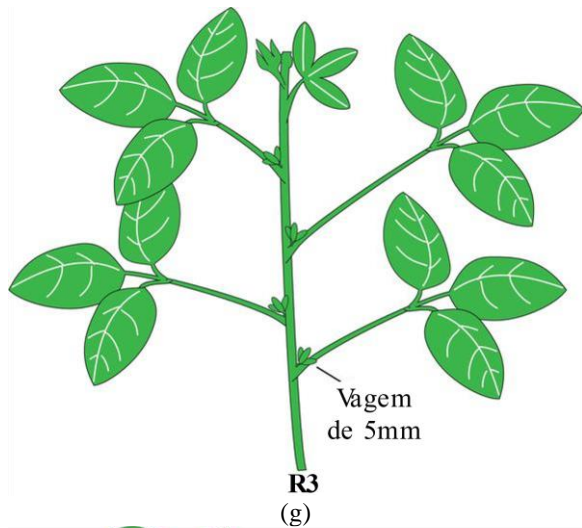
Sobre como a planta se desenvolve ao longo da vida: pode-se dividir em dois grandes grupos, o estágio vegetativo e o estágio reprodutivo. Fases do estágio vegetativo: VE – vegetativo emergente, VC – vegetativo com cotilédone, V1 – vegetativo com primeiro nó, V2 – vegetativo com segundo nó, VN – vegetativo com nó N; fases do estágio reprodutivo: R1 – começo da floração, R2 – floração completa, R3 – começo no desenvolvimento da vagem, R4 – término do desenvolvimento da vagem, R5 – começo da sementeira, R6 – término da sementeira, R7 – começo da maturação, R8 – maturação completa.

De maneira geral, necessita-se de um grau maior das distribuições espectrais de energia para cada estágio de desenvolvimento: VE a VN – luz azul para auxílio de transporte de nutrientes e formação de raiz, R1 a R8 – razão ligeiramente maior de luz vermelha em relação a luz azul, com complementos de luz no espectro do vermelho distante (VAN GELDEREN; KANG; PIERIK, 2018)

Além disso, são mostrados os estágios de crescimento do plantio na Figura 13.

Figura 13 – Estágios de desenvolvimento do cultivar de soja





2.2 SISTEMAS DE AGRICULTURA

Nesta seção são brevemente apresentados os principais tipos de sistemas para a agricultura.

2.2.1 Estufas

O cultivo hidropônico é uma forma de produção agrícola com uso de solução nutritiva em ambiente protegido, apresentando elevada produtividade relativa à área utilizada para o plantio (MONTERO et al., 2011). A produção sustentável de alimentos em cultivo hidropônico, com a utilização direta da água da chuva captada em reservatórios e a possível reutilização da água através de sistemas de tratamento de nutrientes, sendo controlada diretamente pelo produtor rural, são fatores que corroboram para a utilização das estufas agrícolas (SAVVAS, 2002).

A Figura 14 mostra uma estufa capaz de produzir alface de forma controlada e independente da época do ano, devido ao melhor controle sobre a umidade do solo e do ambiente, a temperatura e a ventilação (MENEGAES et al., 2015). Nesses sistemas, é comumente observado o desenvolvimento dos fotorreceptores, favorecendo o maior controle sobre o ciclo fisiológico do cultivar e a irradiação solar típica da região, estabelecendo um sistema preditivo, de acordo com a localidade em que a estufa se encontra (MONTERO et al., 2011).

Estufas agrícolas englobam também o senso de comunidade, onde pequenos produtores rurais podem realizar atividades agrícolas de maneira sustentável. Com isso, influenciando o desenvolvimento de sistemas próprios para a suficiência alimentar de famílias de baixa renda (GRISA; SCHNEIDER, 2008).

Figura 14 – Exemplo de estufa agrícola utilizando hidroponia em cultivares de alface



Fonte:(REVISTA HIDROPONIA, 2015).

2.2.2 Fábrica de Plantas com Luz Artificial (PFALs)

Como uma proposta de melhor controle da ambiência e um apelo sustentável que propõe a redução de recursos utilizados no escoamento da produção de cultivos, bem como os insumos necessários para entregar hortaliças de menor porte, as PFALs, do inglês *Plant Factories with Artificial Light* são estudadas (ORSINI et al., 2020). Há também o apelo técnico sob a óptica da inovação responsável, ampliando também as publicações científicas que divulgam esses projetos (KUSUMA; PATTISON; BUGBEE, 2020). Os presentes esforços de digitalização e automação de processos são considerados para o desenvolvimento da agricultura de precisão, os sistemas PA, do inglês, *Precision Agriculture* (KUMARI; KUMAR, 2018).

Tais ações têm apoio de instituições nacionais e internacionais, como é o caso da ESALQ (Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz), do IAC (Instituto Agrônomo de Campinas –, com oficinas de desenvolvimento de fazendas urbanas, e do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), com propostas de sistemas de controle eletrônico utilizando computadores portáteis, como o projeto *Open Agriculture – Food Computer* (IAC, 2022; MIT, 2020). Ainda, de forma internacional, há a iniciativa de aprimoramento do ambiente através da reabilitação sustentável e da inovação responsável (SINGH et al., 2015).

Brotos verdes, alho poró e mostarda fazem parte dos cultivos mais produzidos nesse tipo de sistema, sem necessidades de pesticidas ou herbicidas, proposto em estudos e indicando que a pegada de carbono pode ser menor que produtos comprados no varejo tradicional (SANTONI et al., 2020). A Figura 15 mostra um exemplo de fazenda urbana vertical com controle da qualidade do ar, da umidade, do sistema de irrigação e da iluminação artificial.

Figura 15 – Fábrica vertical no centro de São Paulo, Brasil

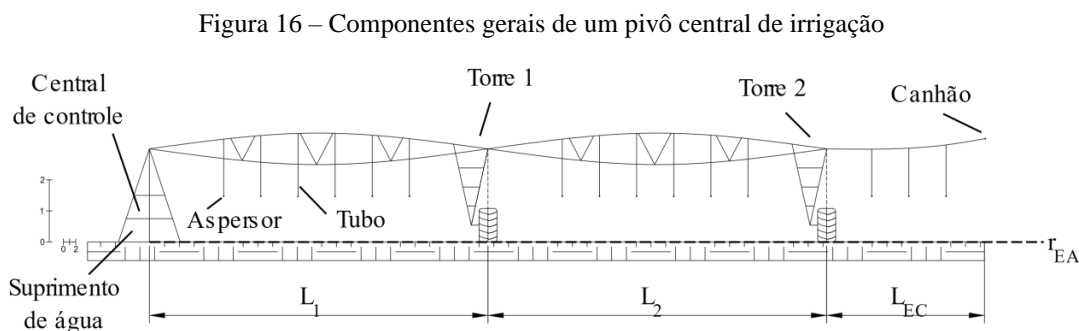


Fonte: (PINK FARMS, 2019).

2.2.3 Pivô de Irrigação

Também chamados de sistemas de suplementação hídrica, são aplicados em áreas de cultivo extensivo, em fazendas de no mínimo dois hectares, de forma a mitigar possíveis problemas relacionados à falta de recursos hídricos, fornecidos principalmente pela precipitação de chuva (EVANS, 2001). Esses sistemas são construídos tendo como base um eixo central de rotação, onde a central de controle está instalada e o suprimento de água é inserido.

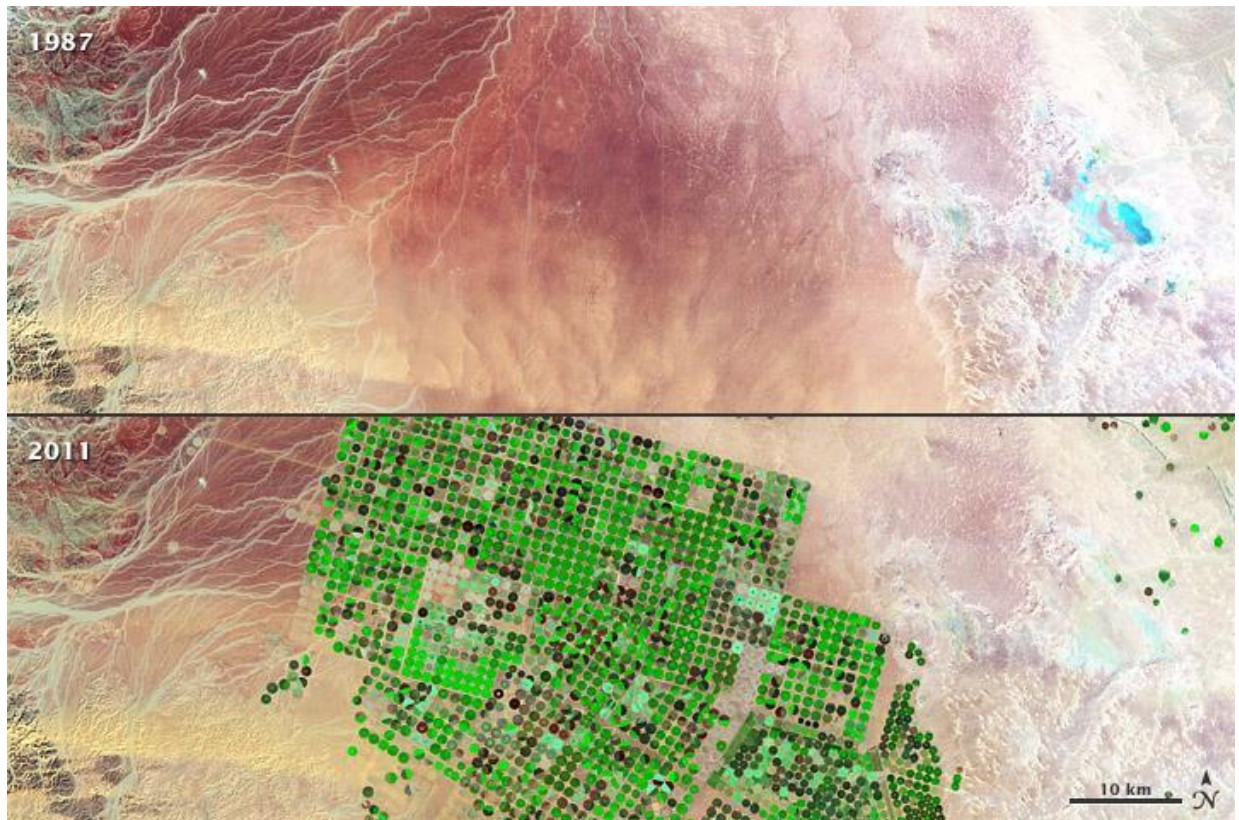
O recurso hídrico é então distribuído ao longo do braço, de torre em torre, utilizando tubos para essa distribuição. A água por fim é dispensada de aspersores, capazes de controlar a vazão e a área de irrigação (AGRIVI, 2020). A Figura 1 ilustrada na introdução do documento fornece uma ideia geral sobre os pivôs de irrigação, sistema de agricultura foco do estudo. Dessa forma mostra-se, também, a Figura 16, contendo os aspectos construtivos de um pivô de irrigação.



Fonte: Autor.

Juntamente com o controle do solo, a predição da irradiação solar, e com o estudo do bioma, é possível produzir determinados plantios em áreas que outrora eram incapazes de produzir tais cultivos. A Figura 17 mostra um desses exemplos, onde o estudo foi realizado e capacitou a atividade agrícola no deserto de *Sharq El Owainat*, no Egito (NASA, 2017).

Figura 17 – Imagens de satélite evidenciando o uso de pivôs de irrigação em desertos



Fonte: (NASA, 2017)

2.3 FIGURAS DE MÉRITO NA AGRICULTURA

Os aspectos da agricultura possuem bases comparativas de acordo com características geológicas, como a topografia e a hidrologia do local, com características químicas, como a composição de nutrientes presentes no solo, as trocas gasosas e a fixação do carbono, características biológicas, como o tipo de semente utilizada e com características ambientais, como a umidade do solo e do ar e a temperatura desses (DEBAUCHE et al., 2018). Por exemplo, um aumento de 2 °C, 3 °C e 6 °C na temperatura do ar pode anular os efeitos benéficos do aumento de CO₂ no rendimento de trigo, soja e milho, respectivamente. (STRECK; ALBERTO, 2006).

Assim, determina-se as figuras de mérito utilizadas na agricultura, de forma a fornecer uma comparação a sistemas propostos anteriormente com uma dada proposta atual. Para isso, deve-se listar quais características são possíveis de serem avaliadas, tanto quantitativamente quanto qualitativamente.

Nesse sentido, define-se no presente trabalho que o índice de produtividade pode ser utilizado como base comparativa, mensurando a quantidade de sacas produzidas por hectare plantado, em $Sc\ ha^{-1}$, medida essa que indica a quantidade de biomassa produzida após a secagem dos grãos, também denominada de massa seca. Qualitativamente, têm-se a altura de corte, o tempo de exposição à irradiação solar, o estiolamento e a análise da função biológica da fotossíntese ao longo do desenvolvimento do cultivo.

2.4 PANORAMA DO CULTIVO DO GRÃO DE SOJA NO RIO GRANDE DO SUL

Nesta seção, é indicada a importância do grão de soja e dos estudos que direcionam a comunidade de produtores rurais ao incremento da produtividade por meio da implementação de novas tecnologias.

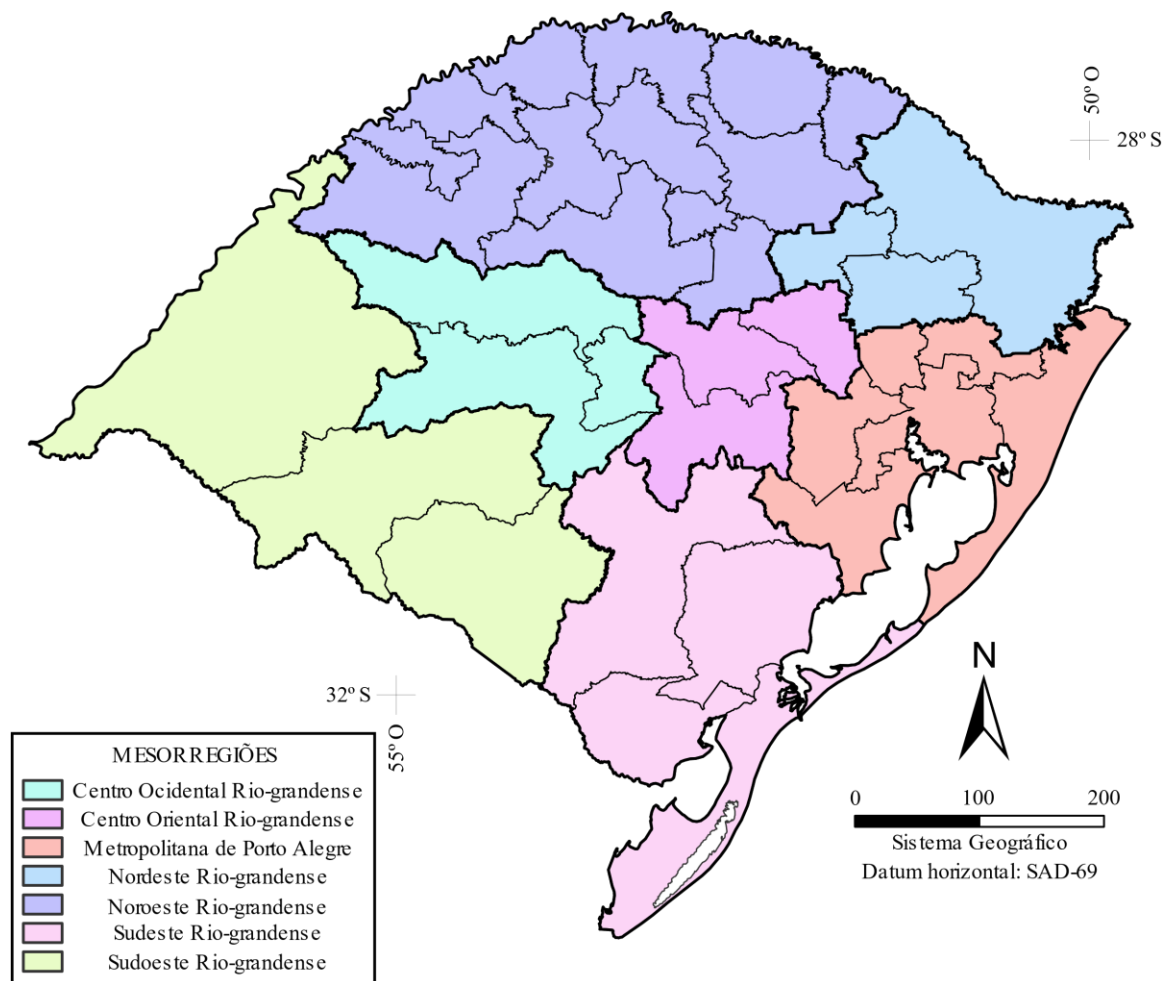
A soja, sob nome científico *Glycine max (L.) Merrill* está perfeitamente adaptada às condições brasileiras, dispondo de elevada tecnologia nacional, alcançando produtividades agrícolas em torno de 3000 a 6000 kg de soja por hectare, ou seja, de 50 a 100 sacas de 60 kg por Hectare (TAGLIAPIETRA et al., 2021). Um plantio de soja fornece de 60 a 80 vagens, cada uma dessas possuindo três grãos. Gerando, assim, óleo de soja e a proteína de soja como principais produtos no momento da colheita (SCHEEREN et al., 2010).

Constantemente, o impacto climático no aumento da temperatura global influencia extensivamente na produtividade do grão, principalmente por dependerem diretamente do fornecimento de água em períodos críticos como o estágio reprodutivo, que ocorre durante o verão do hemisfério sul, nos meses de dezembro a março (SILVA et al., 2022).

Com o auxílio do *EstatGeo* do IBGE, nota-se que o estado do Rio Grande do Sul, produz anualmente 11 milhões de toneladas de soja, representando 9,2% da produção nacional (IBGE, 2020). A região Noroeste Rio-Grandense representa uma área madura do grão, onde a cultura tem sido produzida em larga escala há décadas, tendo a microrregião de Santa Rosa considerada o Berço Nacional da Soja, com cultivos desde a década de 1940 (EMBRAPA, 2019).

O Rio Grande do Sul tem sete mesorregiões: Noroeste Rio-Grandense, Nordeste Rio-Grandense, Metropolitana de Porto Alegre, Centro Ocidental Rio-Grandense, Centro Oriental Rio-Grandense, Sudeste Rio-Grandense e Sudoeste Rio-Grandense (EMBRAPA, 2019). A Figura 18 mostra a divisão dessas mesorregiões (IBGE, 2020).

Figura 18 – Divisão das mesorregiões do Rio Grande do Sul



Fonte: Adaptado de (EMBRAPA, 2019).

Outro fator que contribui para a produtividade é a resistência a absorção de sais minerais, presentes tanto no solo quanto no recurso hídrico utilizado, podendo também ser modificado geneticamente para reter ou não mais água durante o estágio reprodutivo (CONNOR; LOOMIS; CASSMAN, 2011).

Além disso, recentes esforços de digitalização e automação de processos são considerados para o desenvolvimento da agricultura de precisão, os sistemas PA, do inglês, *Precision Agriculture* (KUMARI; KUMAR, 2018). Dessa forma, é necessário a ampliação da pesquisa sobre a influência de sistemas de iluminação ligados aos sistemas de irrigação em latifúndios.

2.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

No presente capítulo, é realizada uma revisão geral sobre a fisiologia vegetal, necessária para a compreensão do problema e para o correto dimensionamento da fonte de luz. São apresentadas as diversas características de sistemas de iluminação, abordando as variáveis da radiometria e considerando as propriedades de transmissão de fótons sob uma perspectiva da física quântica.

Sendo necessário o estudo da ampla gama de tópicos relacionados à agricultura, desde os princípios da fotossíntese até sistemas de agricultura de alta tecnologia, destaca-se a importância das medidas de produtividade em sistemas de cultivo do grão de soja.

3 DIODOS EMISSORES DE LUZ NA HORTICULTURA

Este capítulo apresenta uma breve revisão sobre os diversos aspectos relacionados aos diodos emissores de luz, tanto construtivos como de funcionamento, juntamente com a apresentação das características radiométricas utilizadas na horticultura. Dispositivos esses que são utilizados nos experimentos relacionados à ampliação do estímulo de luz das plantas, mais detalhado nos capítulos quatro e cinco.

Os LEDs são dispositivos que funcionam a partir do princípio da eletroluminescência (CHO et al., 2017). Dentre as principais características que fazem com que os LEDs sejam amplamente utilizados, estão o melhor controle da distribuição espectral de energia, a eficiência térmica em relação a sistemas de iluminação convencionais e o controle espacial da emissão de luz simplificado por meio de óticas auxiliares.

Esses são construídos a partir de uma junção PN e, quando feita a polarização direta, os elétrons e lacunas são atraídos para os terminais opostos a fonte polarizadora, difundindo os elétrons e lacunas ao longo da região de junção, possibilitando o fluxo de carga, também denominado de corrente elétrica (GESSMANN; SCHUBERT, 2004).

De maneira geral, pode-se mostrar os aspectos construtivos, necessários para a compreensão do tema e para propor o sistema de iluminação a LEDs. Nas seções a seguir, também são mostradas as características radiométricas e a utilização desses dispositivos na horticultura.

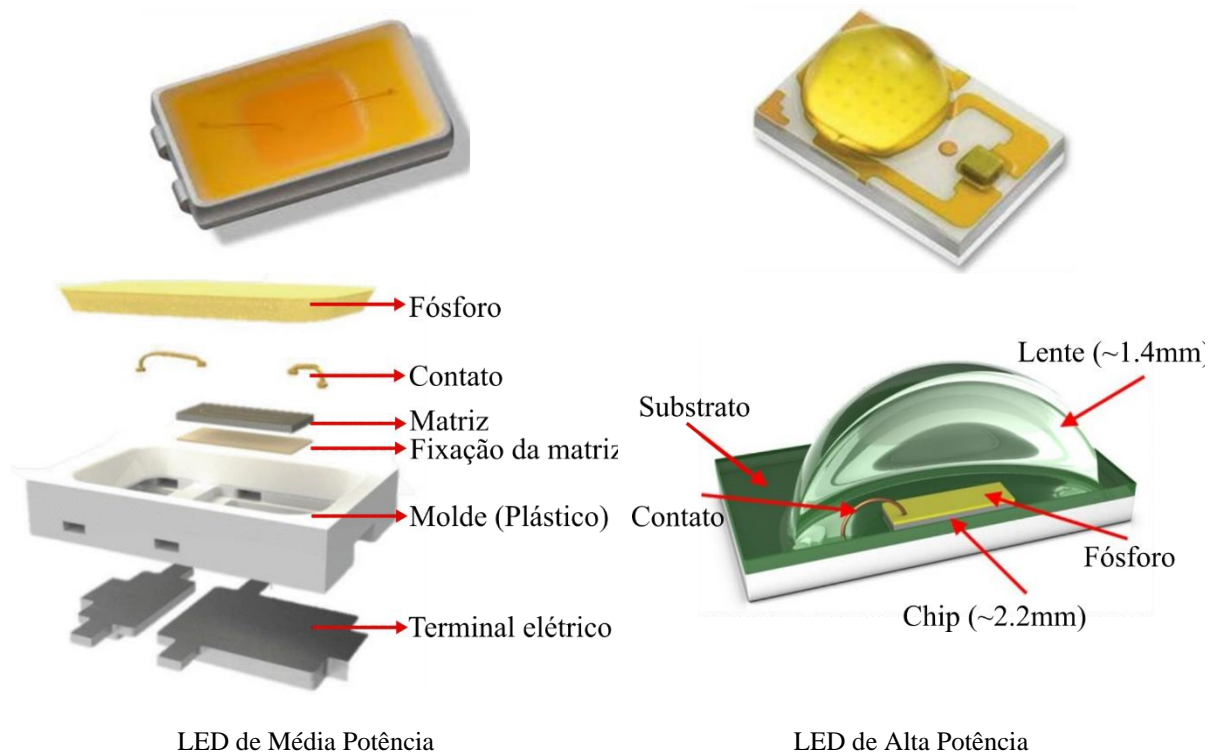
3.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Dividindo-se em duas características principais, os LEDs podem ser de média potência – até 1 W encapsulados em moldes plásticos – e de alta potência – maiores que 1 W e possuindo material cerâmico (CHIES, 2016). Além disso, podem-se classificar de acordo com os substratos utilizados na emissão de espectro específicos, como InGaN (Índio, Gálio e Nitrogênio), GaN (Nitreto de Gálio) e ligas de AlInGaP (Alumínio, Iodo, Índio, Gálio e Fósforo).

A Figura 19 mostra resumidamente as principais diferenças construtivas (DOE, 2022a). Esses dispositivos também são especificados de acordo com a emissão, sendo direta, convertida ou misturada, dependendo de fatores como espectro requerido, eficácia luminosa, custo por

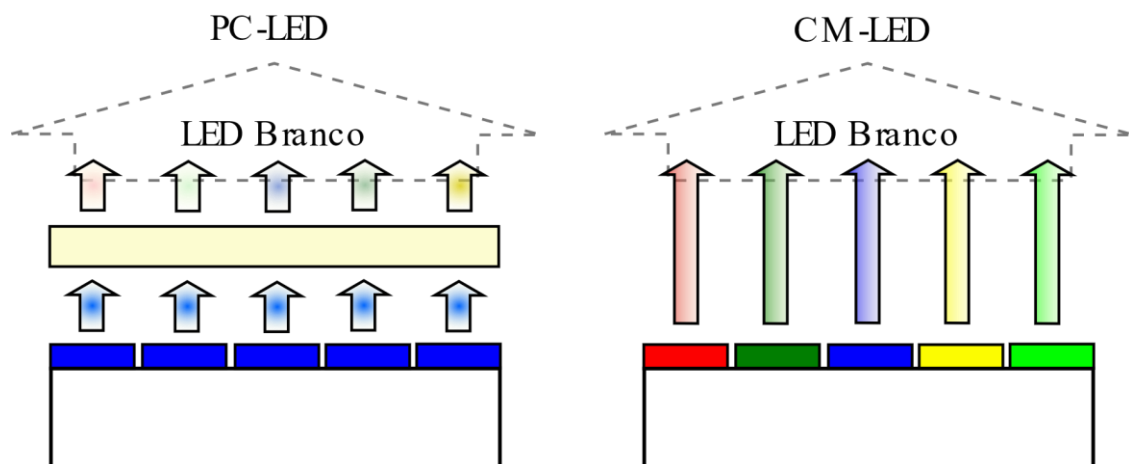
lúmen e gerenciamento térmico. A Figura 20 evidencia a diferença entre o LED branco construído através da mistura de cores, o CM-LED, e o LED branco construído através da conversão de fósforo, o PC-LED (DOE, 2022b).

Figura 19 – Construção típica de LEDs de média potência (a) e de alta potência (b)



Fonte: Autor, adaptado de (DOE, 2022a).

Figura 20 – Diferenças entre PC-LED e CM-LED

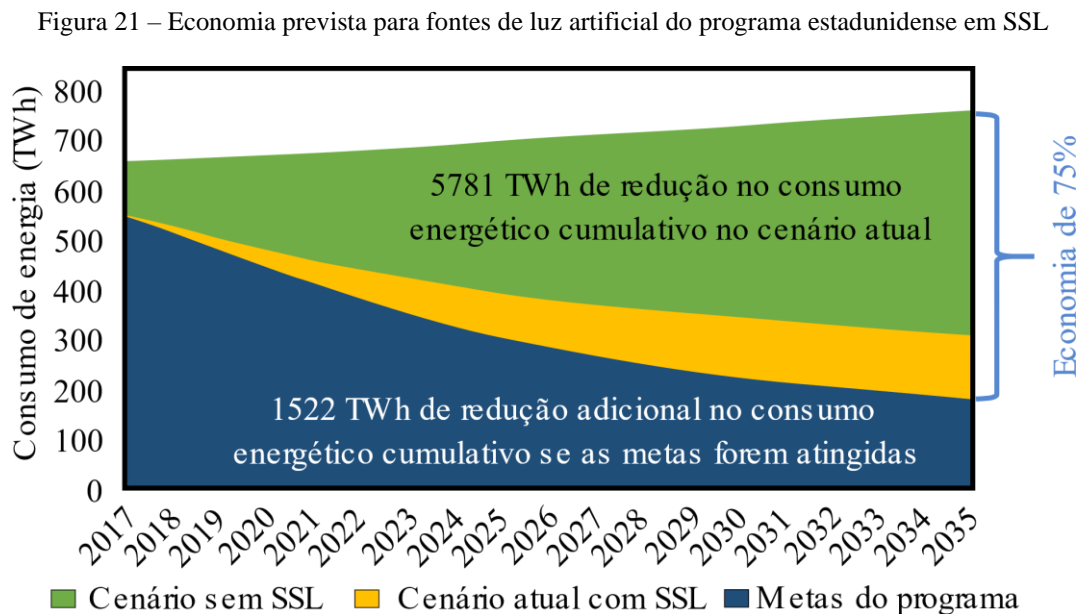


Fonte: Adaptado de (DOE, 2022b).

Os aspectos construtivos remetem ao estado atual da tecnologia dos diodos emissores de luz, podendo estender-se ao desenvolvimento de outros tipos de emissores, como os LEDs orgânicos, os LEDs encapsulados em escala de chip – os CSPs, os mini-LEDs e os micro LEDs. A amplitude de aplicações continua a crescer conforme novos materiais são utilizados, como até mesmo a utilização de Nitreto de Alumínio para LEDs emissores de radiação ultravioleta (TANIYASU; KASU, 2008).

3.2 PANORAMA DA TECNOLOGIA

São apresentadas as principais características e o estado atual da tecnologia de dispositivos de iluminação de estado sólido, mostrando os dados econômicos e a evolução estimada da tecnologia. Nesse sentido, o programa do Departamento de Energia dos Estados Unidos em iluminação de estado sólido estima que até 2035 sejam economizados 1522 TWh destinados a iluminação artificial com a utilização da tecnologia de semicondutores emissores de luz, conforme Figura 21.



Fonte: Adaptado de (DOE, 2022b).

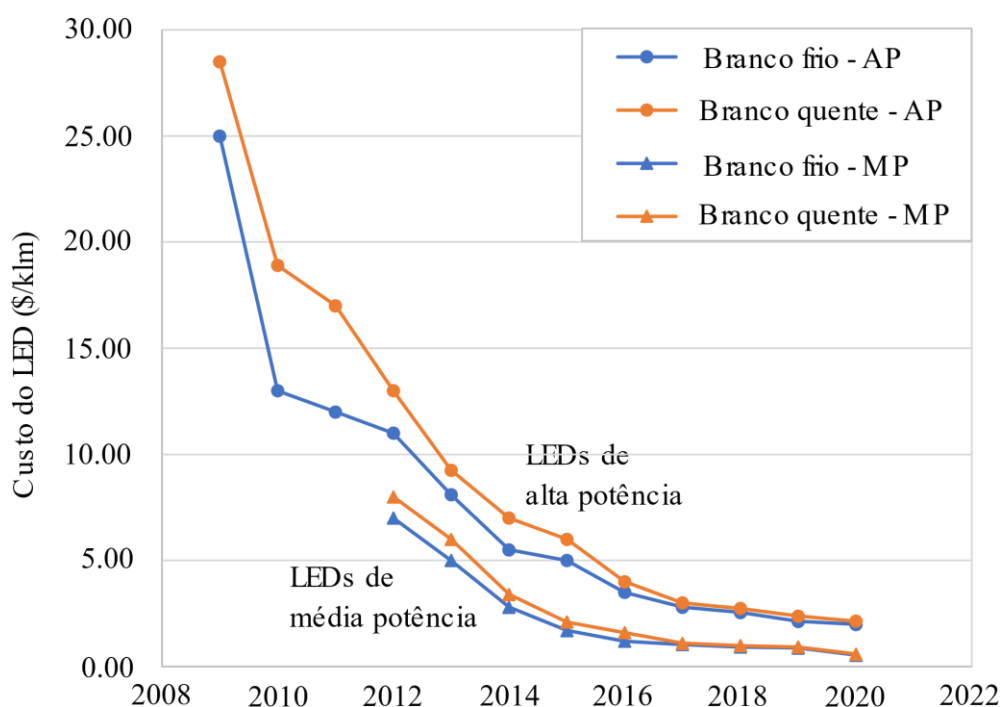
Juntamente ao aumento gradativo da eficácia luminosa dos LEDs, conforme Tabela 2, a redução dos custos de fabricação, evidenciado na Figura 22, leva às crescentes propostas de estudo e do desenvolvimento de sistemas de iluminação a LEDs para diversas finalidades, com a horticultura sendo uma delas e a principal aplicação apresentada neste trabalho.

Tabela 2 – Níveis alvo de eficácia luminosa para LEDs tipo PC e tipo CM

Medida	Tipo	2020	2025	2030	2035	2050
Eficácia Luminosa (lm/W)	Branco frio (PC)	185	228	246	249	250
	Branco quente (PC)	165	210	231	241	250
	Branco (CM)	138	204	245	281	336

Fonte: Adaptado de (DOE, 2022b).

Figura 22 – Custo do LED ao longo do tempo em dólares por quilo-lúmen



Fonte: Adaptado de (DOE, 2022b).

A Figura 23 e a Figura 24 mostram uma previsão do aumento da eficiência térmica e da eficiência na conversão em potência elétrica em potência radiante de PC-LED e CM-LED, colaborando ainda mais para a utilização desses dispositivos em sistemas de horticultura (DOE, 2022b; PAUCEK et al., 2020). Há, portanto, um potencial de implantação de LEDs cada vez mais eficientes e menos custos em sistemas de iluminação artificial, com a previsão de que na próxima década tenha-se fontes de luz criadas a partir da mistura das cores em níveis iguais se não superiores de eficácia em relação as soluções atuais com conversão de fósforo.

Um dos paradigmas atuais é projetar sistemas eficientes e flexíveis que forneçam saúde, produtividade e bem-estar, seja em aplicações centradas ao ser humano ou voltadas para o aumento de produtividade animal ou vegetal. Para o estudo de caso do presente trabalho, os substratos como InGaN, GaN e InAlGaP podem ser utilizados na especificação da fonte de luz com emissão que esteja na PAR, com emissões a partir dos 400 nm até os 700 nm.

Figura 23 – Comparativo entre CM-LED e PC LED da eficácia luminosa da fonte e da eficácia na conversão de potência

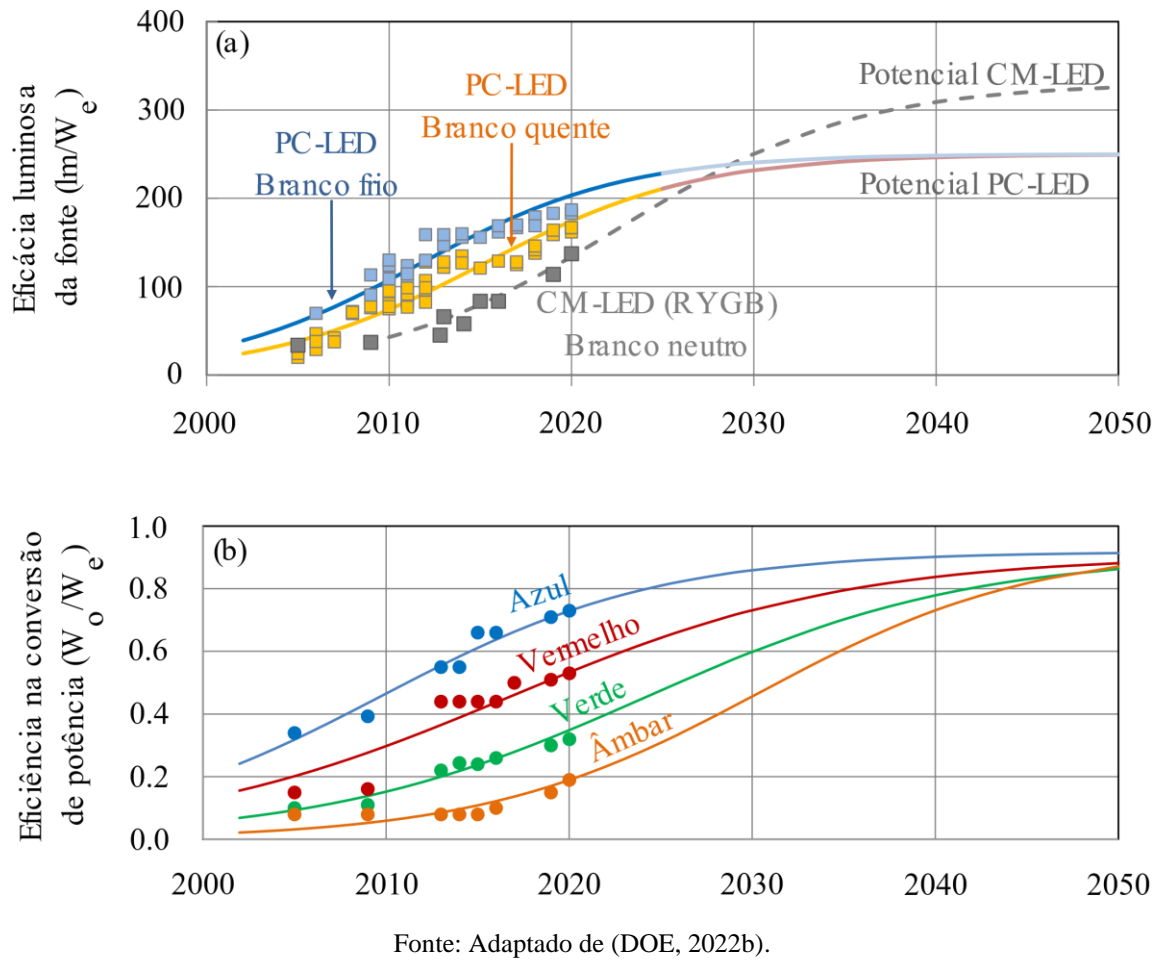
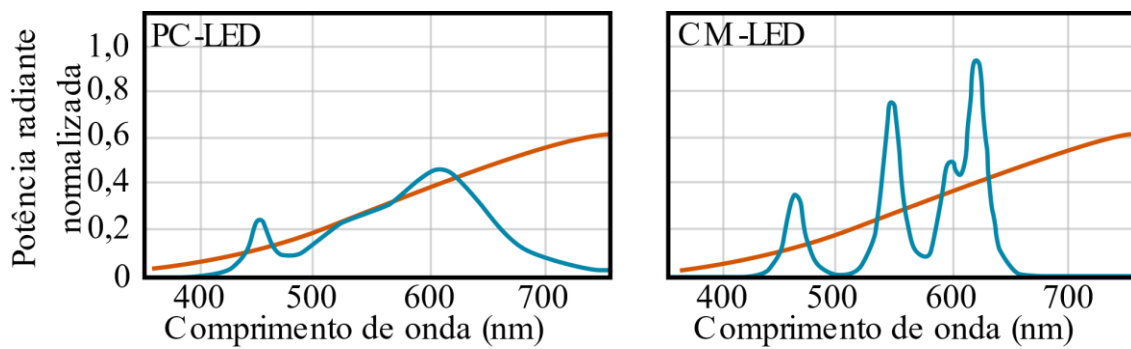


Figura 24 – Comparativo da capacidade de emissão de potência radiante entre PC-LED e CM-LED



Fonte: Adaptado de (MORGAN PATTISON; HANSEN; TSAO, 2018).

3.3 CARACTERÍSTICAS RADIOMÉTRICAS

São representadas de maneira geral através da quantificação da radiação eletromagnética. Por tratar-se de um sistema de iluminação, essas características são abordadas a seguir de maneira a isolar o efeito dessa radiação em plantios, demonstrado brevemente na seção 2.1.2.1.

3.3.1 Energia Radiante

Trata-se da energia que é emitida, transferida ou recebida na forma de radiação eletromagnética, a qual a unidade é o Joule [J].

3.3.2 Fluxo Radiante

Também chamada de potência radiante, conforme Equação (3), é a potência, ou seja, a energia por unidade de tempo, emitida, transferida ou recebida na forma de radiação eletromagnética (BASS, 2010). Possui o Watt [W] como unidade padrão de medida.

$$\Phi_r = \frac{dQ}{dt} \quad (3)$$

3.3.3 Irradiância

Possuindo a unidade $W m^{-2}$, é a razão da potência que incide na área de um elemento infinitesimal. É evidenciada na Equação (4) (BASS, 2010).

$$E_r = \frac{d\Phi}{dA} \quad (4)$$

3.3.4 Lei do Cosseno de Lambert

Descreve como a energia é espalhada de acordo com o ângulo de incidência e com a distância da fonte de luz, descrita na Equação (5) (LAI, 2009). Utilizando o conceito de conservação de energia, a lei de Lambert também descreve que a energia em determinada distância da fonte de emissão tem uma relação quadrática a energia da fonte de luz, conforme a Equação (6).

$$E_\theta = E \cos(\theta) \quad (5)$$

$$E_1 d_1^2 = E_2 d_2^2 \quad (6)$$

3.3.5 Distribuição Espectral de Potência

Vista anteriormente na seção 2.1.1, pode também ser chamada de SPD, do inglês *Spectral Power Distribution*, sendo a potência radiante distribuída ao longo do comprimento de onda, medida em $W\,nm^{-1}$ (LAI, 2009).

3.3.6 Resposta das Plantas à Luz

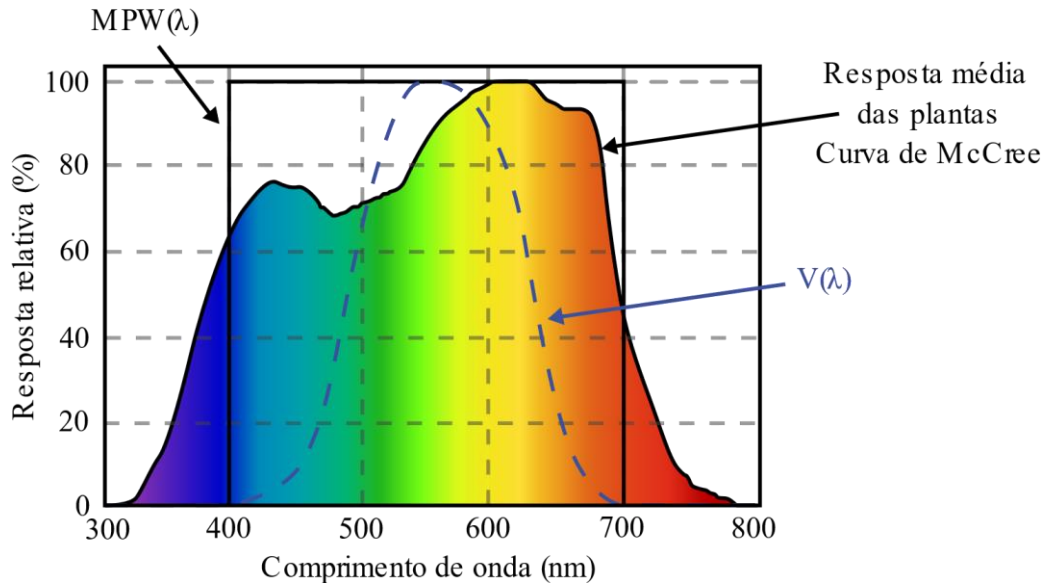
Para a melhor compreensão da resposta das plantas a luz, faz-se necessária a apresentação do conceito de fluxo luminoso, conforme a Equação (7) (BASS, 2010). Onde k_m representa a eficácia luminosa do olho humano, tendo o valor de $683\,lm\,W^{-1}$ e $V(\lambda)$ sendo a função espectral de sensibilidade para o observador padrão na vista fotópica (CIE, 2019).

$$\Phi_v = k_m \int \Phi_r(\lambda) V(\lambda) d(\lambda) \quad (7)$$

3.3.6.1 Região fotossinteticamente ativa

Descrita brevemente na seção 2.1.2, a PAR é utilizada como um conceito análogo a curva de sensibilidade típica do olho humano na vista fotópica, utilizando o fluxo radiante Φ_r e limitando a avaliação dos pontos de 400 nm a 700 nm. Tendo, portanto, $MPW(\lambda)$ ao invés de $V(\lambda)$. Para critérios de comparação, a Figura 26 mostra as duas curvas características, da sensibilidade típica do olho humano e da PAR.

Figura 25 – Comparativo entre a PAR e a curva de sensibilidade típica do olho humano



Fonte: Adaptado de (DIN, 2018).

3.3.6.2 Fluxo de fótons fotossintéticos

Dessa forma, o PPF, do inglês, *Photosynthetic Photon Flux* é definido limitando a potência radiante contida na PAR, conforme a Equação (8).

$$\Phi_{PAR} = \int_{400}^{700} \Phi_r(\lambda) MPW(\lambda) d(\lambda) \quad (8)$$

O PPF da Equação (8) é obtido em $J\ nm\ s^{-1}$. Necessita-se, no entanto, trazer as unidades quantitativas relacionadas a quantidade molar, ou seja, a quantidade de energia que está sendo transferida para o plantio, conforme Equação (9):

$$PPF = \frac{PPF}{N_A hc} \quad (9)$$

$$\left[\frac{\mu mol}{s} \right] = \left[\frac{J\ nm\ s^{-1}}{mol^{-1} J\ s\ m\ s^{-1}} \right]$$

Onde N_A é o número de Avogadro ($6,02 \cdot 10^{23}\ mol^{-1}$), h é a constante de Planck ($6,63 \cdot 10^{-34}\ J\ s$) e c a velocidade da luz ($3,00 \cdot 10^8\ m\ s^{-1}$) (KADRY, 2014).

3.3.6.3 Densidade de fluxo de fótons fotossintéticos

De maneira análoga a iluminância, onde tem-se o valor do fluxo luminoso distribuído numa área, definido no SI como $lm\ m^{-2}$, ou lux, pode-se definir o PPF, do inglês *Photosynthetic Photon Flux Density* (CIE, 2019). Assim, possuindo a unidade de $\mu\ mol\ s^{-1}\ m^{-2}$.

3.3.6.4 Eficácia de fótons fotossintéticos

Também de maneira análoga a eficácia luminosa, a PPE pode ser definida na relação entre o PPF e a energia consumida pela fonte de luz. Sendo Watt representado em $J\ s^{-1}$, a PPE é definida em $\mu\ mol\ J^{-1}$.

3.3.6.5 Exemplo de especificação técnica de LEDs para horticultura

As grandezas apresentadas são imprescindíveis para o dimensionamento do sistema de iluminação durante o projeto radiométrico deste. Como é o exemplo do LED Osram GH CSSRM4.24 que, na geração atual, oferece uma potência radiante de 1064 mW e 76% de eficiência luminosa, fornecendo um valor de PPF de $5,82\ \mu\ mol\ s^{-1}$ a uma eficácia de $4,16\ \mu\ mol\ J^{-1}$ quando aplicada neste uma corrente de 700 mA (OSRAM, 2022).

3.4 UTILIZAÇÃO DE LEDS NA HORTICULTURA

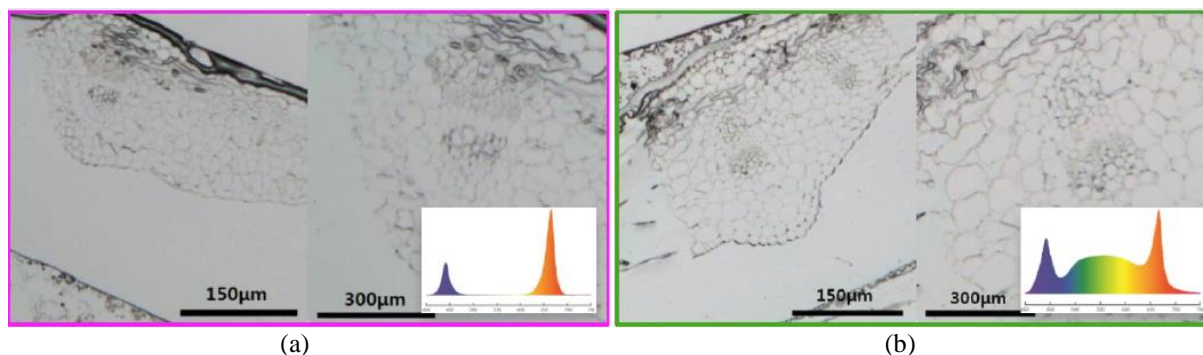
Conforme visto na seção 3.2, a utilização de LEDs com emissão direta para a cor azul nos estímulos de Clorofila a. Analogamente, pode-se utilizar os LEDs de emissão direta da cor vermelha – na faixa dos 650 nm – para os estímulos de Clorofila b (WEAVER; VAN IERSEL, 2020).

Assim como a utilização dos LEDs coloridos para estimular hormônios como a melatonina em seres humanos, o uso de LEDs no espectro do vermelho distante, de 700 nm a 800 nm, pode provocar a inibição dos fotorreceptores e sinalizar a respiração celular em vegetais ativando funções dos fitocromos P_r e P_{fr} (SAGER et al., 1988).

A facilidade na reprodução das cores com o uso da mistura de LEDs que possuam distribuição espectral estreita, simplifica o uso desses dispositivos em experimentos realizados em estufas e fazendas verticais, tornando possível a validação rápida do espectro necessário para a ativação ou inibição das funções fisiológicas desses vegetais (ASHDOWN; DESIGN, 2015).

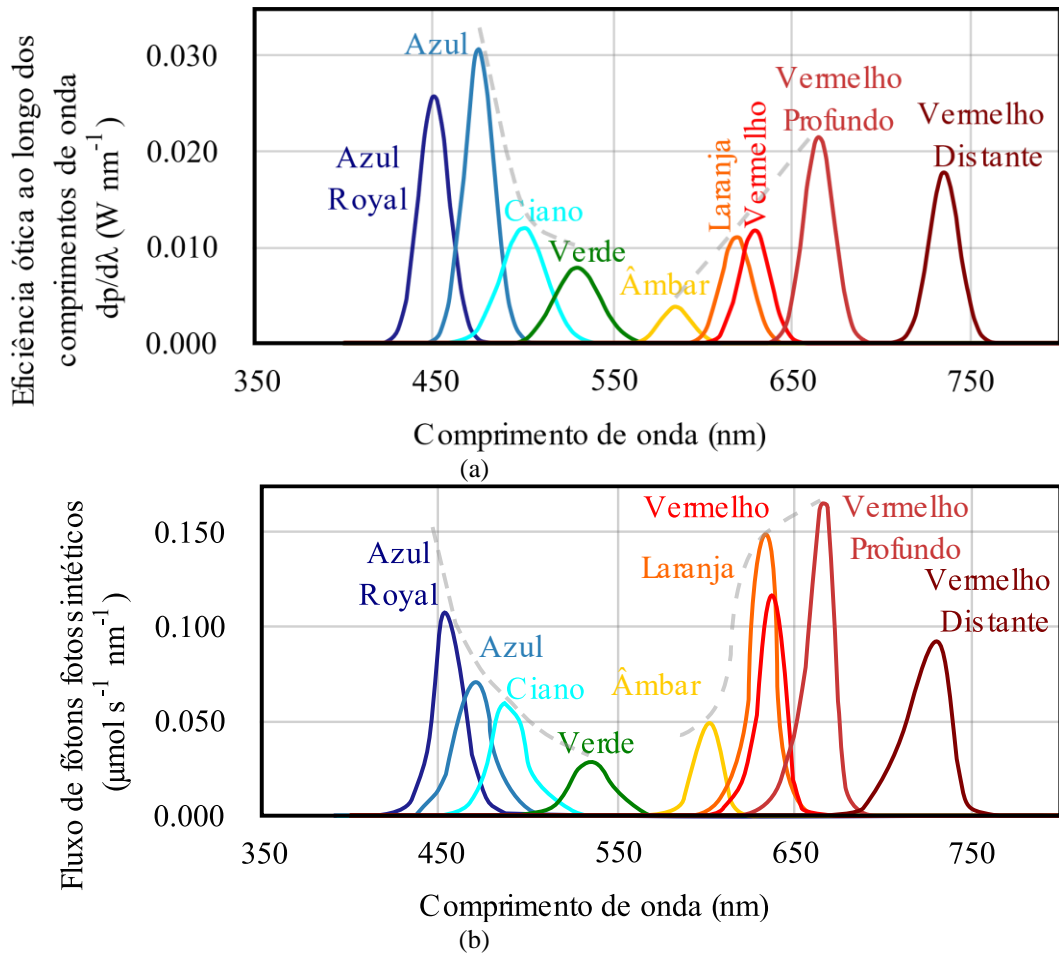
Como é o caso da Figura 26, onde são evidenciados fatores qualitativos do plantio quando este é submetido a uma radiação com distribuição espectral estreita e quando se é utilizada uma radiação com distribuição ampla (ELKINS; VAN IERSEL, 2020). Tal parâmetro se diz respeito ao que foi visto na seção 2.1.2.2, relacionando o que é absorvido pelos fotorreceptores e como tecidos condutores podem ser formar de acordo com o tipo da fonte de luz.

Figura 26 – Comparativo entre os tecidos condutores de um mesmo cultivo de alface submetido a luz com espectro estreito (a) e submetido a luz de espectro amplo (b)



Fonte: (ELKINS; VAN IERSEL, 2020).

Figura 27 – Eficiência óptica de LEDs comparados a distribuição espectral de potência (a) e ao fluxo de fótons fotossintéticos (b)



Fonte: Adaptado de (KUSUMA; PATTISON; BUGBEE, 2022).

Já na Figura 27, é possível ilustrar-se os avanços da tecnologia dos semicondutores no que diz respeito à eficácia óptica, comparando a utilização dos LEDs em relação a sua distribuição espectral de potência e em relação a capacidade máxima de PPF e de acordo com a eficácia do fóton (KUSUMA; PATTISON; BUGBEE, 2022).

Essa característica de evolução da tecnologia corrobora para a maior utilização dos dispositivos em aplicações de horticultura, fornecendo uma maior eficácia do sistema.

3.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

O estado da arte dos LEDs é apresentado ao longo do capítulo, sob uma abordagem das medidas radiométricas, considerando a dualidade da luz e mostrando conceitos quânticos voltados ao projeto de uma fonte de luz para horticultura. De maneira geral, o panorama da tecnologia fornece informações relevantes sobre a utilização desses dispositivos.

Devido a falta de estudos sobre sistemas agrícolas que empregam LEDs como sistema complementar a luz solar, amplia-se a base de conhecimento de forma a propor uma metodologia de projeto de um sistema de iluminação em pivôs de irrigação, a ser apresentada no capítulo seguinte.

4 METODOLOGIA DE PROJETO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PARA HORTICULTURA EM PIVÔS DE IRRIGAÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as características consideradas para o dimensionamento do sistema de iluminação no pivô central, bem como a metodologia de projeto proposta. Por fim, é calculado o PPF necessário, considerando determinada dose diária de luz para uma área irrigada definida pela altura e pela distribuição das luminárias ao longo do braço do pivô de irrigação.

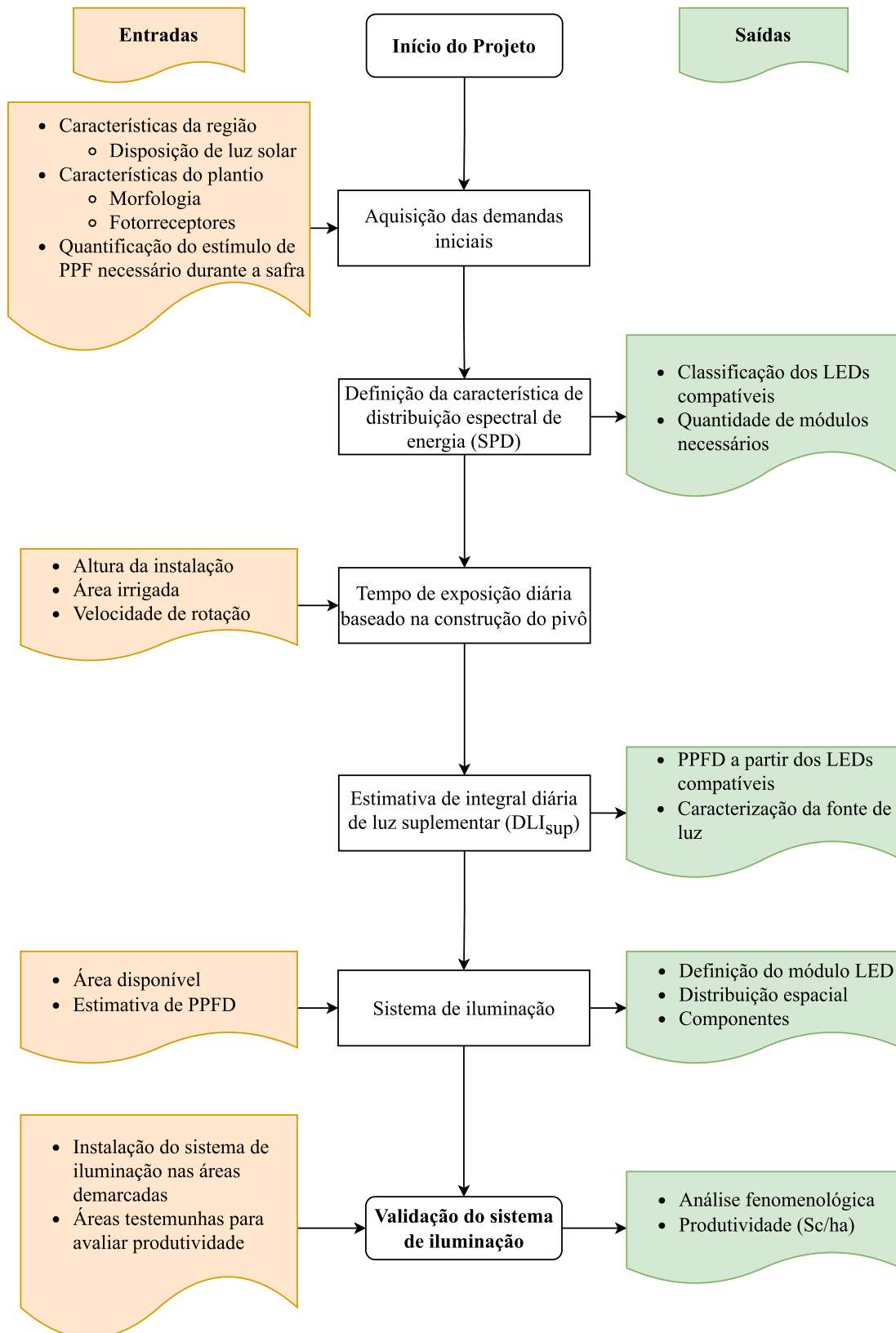
Com a finalidade de se projetar um sistema de iluminação artificial para horticultura, é apresentada uma metodologia através das etapas de projeto, sendo divididas nas seções deste capítulo. Através da caracterização da fonte de luz, da validação do valor necessário de fluxo de fótons fotossintéticos e da estimativa do tempo de exposição, são descritos os passos para a obtenção dos parâmetros necessários para o projeto do sistema.

Baseado nessas informações, um estudo de caso é realizado, utilizando as premissas da metodologia do projeto de iluminação em uma plantação de soja. Ainda, são adquiridas as características elétricas e radiométricas que regem o sistema de iluminação. A partir das premissas fornecidas pela equipe de agronomia, calcula-se a integral de luz diária (DLI) e o tempo de exposição das plantas na luz artificial com as informações do pivô central.

4.1 PASSOS PARA A DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO

Com as principais características apresentadas no capítulo anterior, são descritos abaixo os passos da metodologia proposta. A Figura 28 sumariza as etapas da metodologia em forma de fluxograma.

Figura 28 – Fluxograma da metodologia proposta



Fonte: Autor.

4.1.1 Aquisição das Demandas Iniciais

Através dos requerimentos de SPD e de PPF, fornecidos por estudos agronômicos, realiza-se a escolha da fonte de luz.

4.1.2 Característica da Fonte De Luz

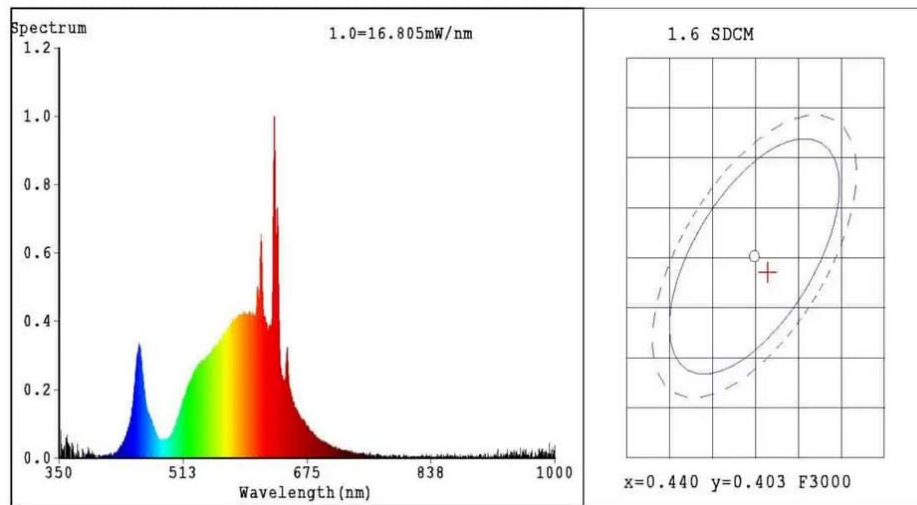
Para o projeto do sistema de iluminação, é necessário caracterizar a fonte de luz, tendo como requisito prévio qual serão os fotorreceptores que devem ser estimulados. Por meio de equipamentos capazes de medir o espectro de radiação, ou seja, em quais comprimentos de onda os fótons estão sendo emitidos, obtém-se a característica de distribuição espectral de potência, definida anteriormente como SPD.

4.1.3 Definição da Distribuição Espectral de Potência

Como uma possibilidade de obtenção da SPD, de forma a aferir a característica da fonte de luz descrita na folha de dados dos LEDs, as esferas integradoras são utilizadas. Esses dispositivos são capazes de concentrar a radiação emitida por uma fonte de luz em um sensor, onde a potência radiante pode ser medida.

Geralmente possuindo resolução de 1 nm, os espectrômetros acoplados as esferas integradoras são capazes de medir a potência emitida pela fonte de luz em razão do comprimento de onda. Tendo comumente uma faixa de operação de 350 nm a 800 nm, a utilização desses dispositivos se torna atrativa para a caracterização de fontes de luz para horticultura, uma vez que a região fotossinteticamente ativa é compreendida pela faixa de 400 nm a 700 nm.

A Figura 29 ilustra um exemplo de relatório fornecido por um espectrômetro, onde a SPD é mostrada. Assim, com o conceito de fluxo de fótons fotossintéticos apresentado na seção 3.3.6.2, é possível obter o PPF através dos resultados de potência radiante, adquiridos por meio da esfera integradora.

Figura 29 – Relatório de SPD no *software* HAAS-1200

Color Parameters:

Chromaticity Coordinate: $x=0.4415$ $y=0.4014$ / $u'=0.2547$ $v'=0.5210$
 CCT=2902K (Duv=-0.0017) Dominant WL:Ld =583.8nm WL:Lc = --nm Purity=53.0%
 Ratio:R=24.0% G=74.1% B=1.9% Peak WL:Lp=632.6nm FWHM=8.3nm
 Render Index:Ra=83.5 AvgR=77.5 TM30:Rf=82 Rg=100

Fonte: (LEDYI, 2022).

4.1.4 Tempo De Exposição E Integral De Luz Diária

A suplementação de PPF diário, fornecido pelo sistema de iluminação, influencia diretamente no valor de DLI em que o plantio está exposto. O aumento da DLI pode proporcionar maior taxa de fotossíntese e assimilação de nutrientes. Para isso, o tempo de exposição do plantio a iluminação adicional deve ser estimado.

Por isso, o valor de DLI por noite está relacionado à velocidade angular do pivô central, especificada em $m h^{-1}$. Tendo como base pivôs comercialmente disponíveis, estima-se que, para uma fonte de luz uniforme e com feixe de 120° , o tempo de exposição esteja entre dez minutos – em pontos mais próximos do eixo de rotação do pivô – e três minutos – em pontos mais distantes do eixo de rotação do pivô. Tais valores são definidos utilizando dados do fabricante, como: distância do eixo até a torre final e tempo típico para volta completa.

4.1.5 Escolha dos LEDs

Para a caracterização da fonte de luz conforme os requerimentos do projeto, é necessário buscar opções de LEDs compatíveis com o espectro requerido, balanceando parâmetros como a eficácia do fóton, a potência elétrica, a corrente e a tensão de operação. Fundado nisso, uma placa de circuito impresso deve ser utilizada com a quantidade necessária de LEDs para se atingir o requerimento de PPF.

4.1.6 Determinação da Distribuição Espacial de PPF

A escolha do ângulo do feixe de emissão da fonte de luz influencia diretamente em como o fluxo de fótons fotossintéticos serão distribuídos no espaço. Dessa forma, deve-se atentar para a homogeneidade necessária para o projeto e buscar ópticas auxiliares compatíveis.

4.1.7 Componentes e Equipamentos do Sistema

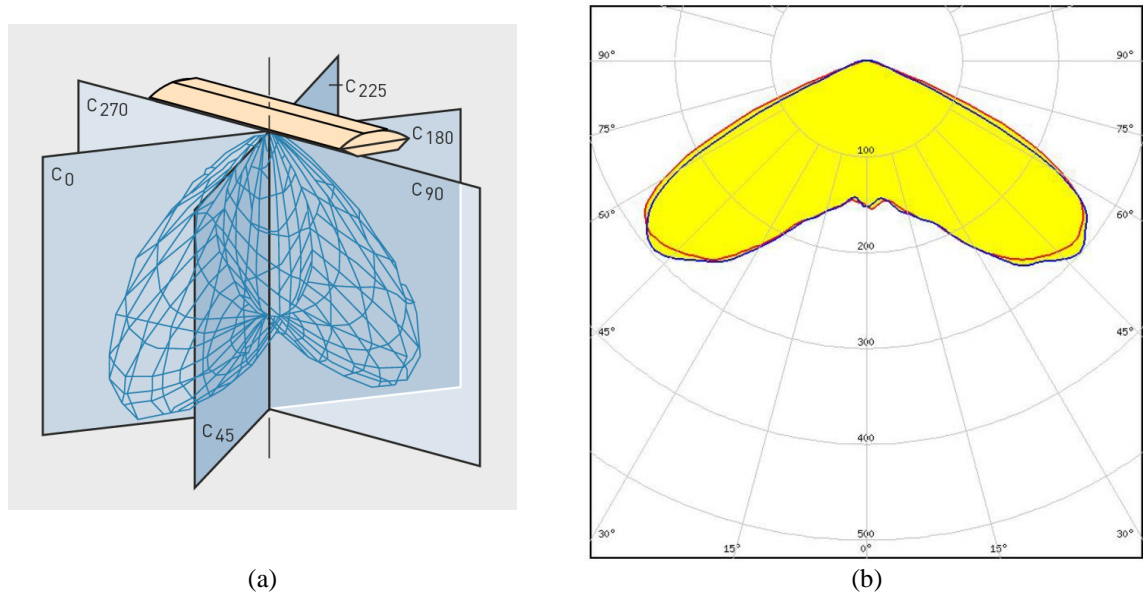
Por fim, faz-se a análise dos componentes disponíveis comercialmente. Com base nas características elétricas dos LEDs, dimensionam-se os dispositivos de acionamento, ou *drivers*, responsáveis por fornecer os níveis adequados de corrente e tensão. Além disso, devem ser consideradas as peças para sustentação mecânica, como ferragens e mecanismos de fixação.

4.1.8 Caracterização da Distribuição Espacial da Luz

Outra característica importante da fonte de luz é a forma como os raios de luz são distribuídos ao longo do espaço onde essa está aplicada. Essa caracterização é imprescindível para o correto dimensionamento e para a determinação do local de instalação da luminária proposta.

Tal propriedade pode ser visualizada com o uso de gráficos de distribuição de intensidade luminosa. O gráfico da Figura 30 pode ser interpretado como dois cortes de superfície que utilizam o sistema plano C, possuindo duas vistas, uma frontal – de 0° a 180° – e outra lateral – de 90° a 270°.

Figura 30 – Representação do sistema plano C (a) e resultado óptico da lente CS16619_DAHLLIA (b)



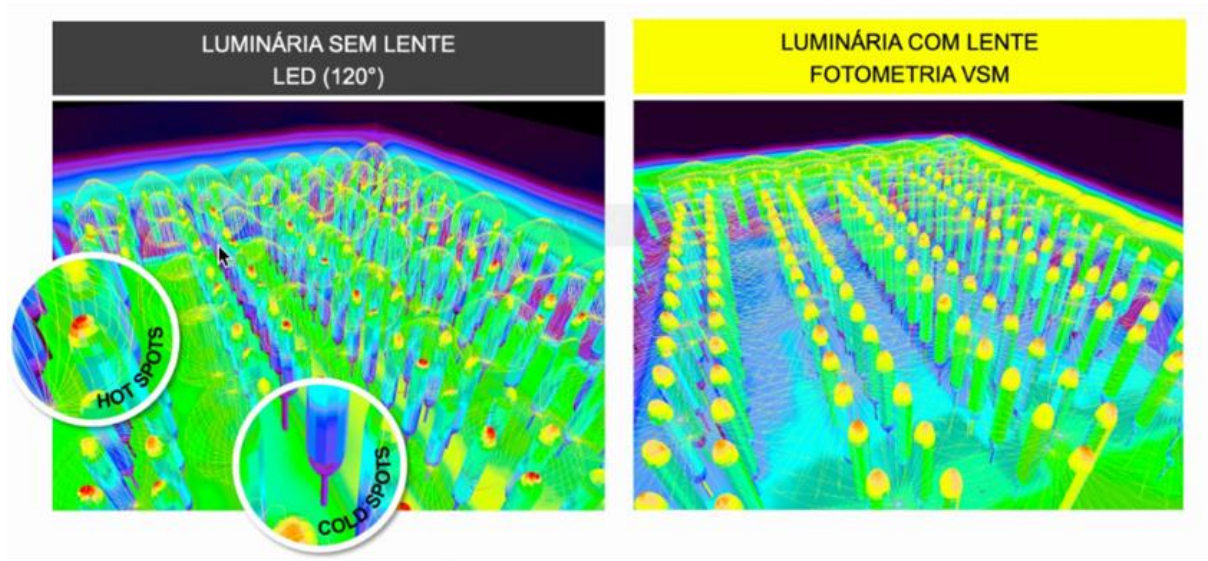
Fonte: (LEDIL, 2018a).

De forma a mensurar essa distribuição luminosa espacial, é necessário um goniofotômetro, que é um instrumento usado para medir a distribuição da luz refletida ou emitida por uma superfície em diferentes ângulos. Esses equipamentos são comumente construídos de duas formas: um conjunto de espelhos que direcionam a luz para câmeras e sensores, que por sua vez fazem a leitura da luz em cada ângulo; um braço mecânico que rotaciona a fonte de luz em dois eixos e um sensor fixo adquire a intensidade luminosa emitida de diversos ângulos, até formar o resultado óptico.

Por fim, a característica de distribuição da luz pode ser modificada utilizando lentes auxiliares. A aplicação desses dispositivos visa não só a proteção contra o ambiente onde a fonte de luz está inserida, mas também ajuda na homogeneidade da energia emitida por essa.

A Figura 31 exemplifica a distribuição de luz em dois cenários: um com baixa uniformidade de luz (esquerda) e outro com melhor uniformidade de luz (direita). Denominados de *hotspots*, ou pontos quentes, esse efeito é determinado pela distribuição de luz e pode afetar diretamente no desenvolvimento do cultivar, uma vez que as folhas cresceriam de forma não uniforme, causando sombras e desacelerando o desenvolvimento em pontos de menor incidência de luz.

Figura 31 – Distribuição espacial de luz considerando uma luminária sem óptica auxiliar (esquerda) e uma luminária com óptica auxiliar VSM (direita)



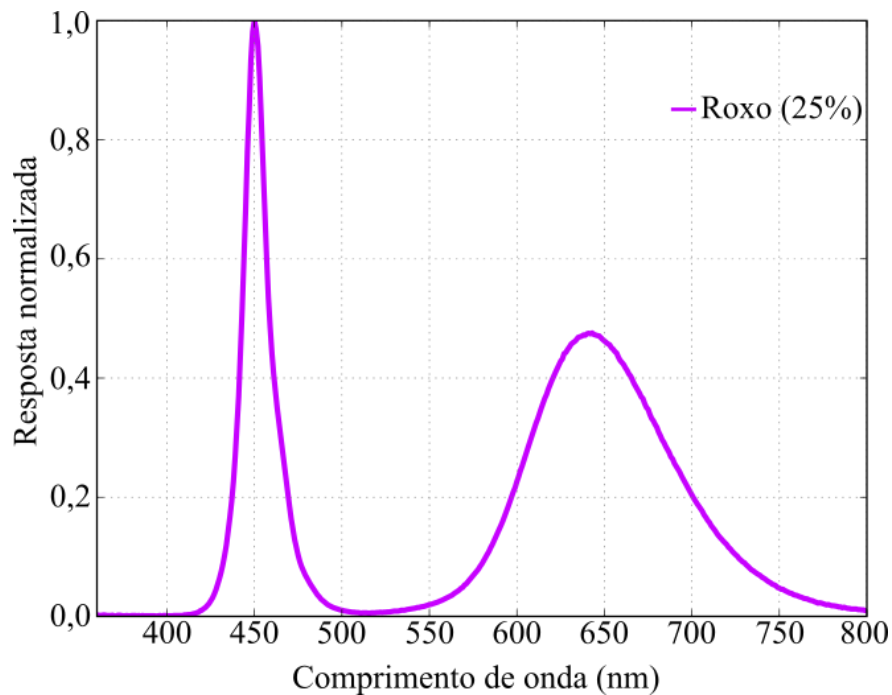
Fonte: (LEDIL, 2018b).

4.2 ESTUDO DE CASO

Empregando os passos da metodologia, define-se o sistema de iluminação para horticultura a ser utilizado nos experimentos realizados na safra de soja. Com base nas especificações iniciais de PPF e de SPD, definidos pela equipe de agronomia, analisaram-se os LEDs disponíveis no mercado.

De forma a estimular o pigmento, ou seja, o fotorreceptor respectivo à Clorofila b, define-se o LED Lumileds L1SP-PRP2002800000, uma mistura entre vermelho e azul, chamada de Roxo (25%), também chamado de LED de fósforo laranja. A SPD do LED é apresentada na Figura 32. A mesma pode ser aferida através de ensaios em uma esfera integradora, conforme Figura 33.

Figura 32 – Distribuição espectral de potência do LED Lumileds L1SP-PRP2002800000

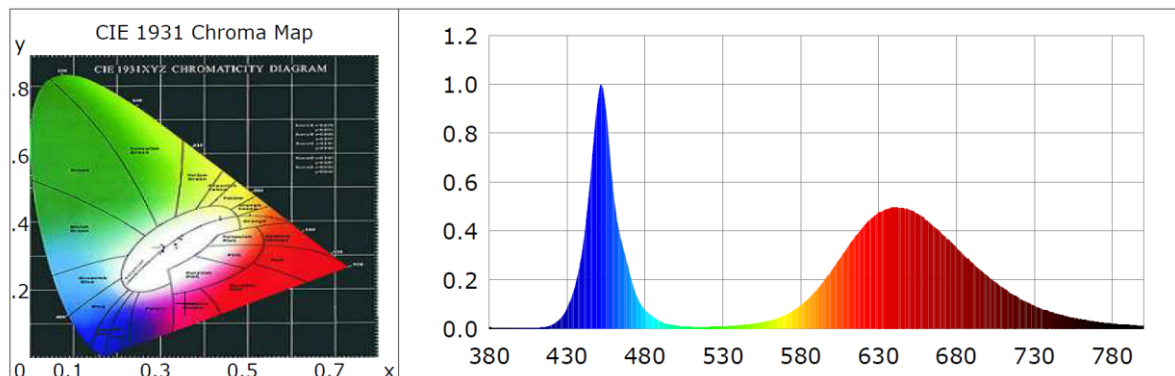


Fonte: Adaptado de (LUMILEDS, 2022).

Figura 33 – Dados radiométricos da fonte de luz artificial utilizada

CIE Colorimetric Parameters

Chromaticity coordinates: $x=0.3570$ $y=0.1625$ $u(u')=0.3371$ $v=0.2302$ $v'=0.3453$
 CCT: $T_c=1681K$ ($duv=-0.13031$) Color Ratio: $R=0.580$ $G=0.326$ $B=0.094$
 Peak Wavelength: 452nm Half Bandwidth: 17.8nm
 Dominant Wavelength: 0.0nm Color Purity: 0.000
 Rendering Index: $R_a=-7.2$
 $R_1=58$ $R_2=-8$ $R_3=-73$ $R_4=20$ $R_5=25$ $R_6=-98$ $R_7=-26$ $R_8=48$
 $R_9=53$ $R_{10}=-132$ $R_{11}=24$ $R_{12}=-399$ $R_{13}=22$ $R_{14}=10$ $R_{15}=41$



Photometric Parameters

Luminous Flux: 2179.8 lm
 Radiant Power: 18.825 W

Fonte: Autor.

Para atingir o valor de PPF, é necessário obter o valor de corrente necessária no LED. Dessa forma, escolhe-se um produto de 50W de potência elétrica capaz de atingir $90,2 \mu mol s^{-1}$, com corrente direta de 340mA em 48 LEDs Lumileds L1SP-PRP2002800000 (LUMILEDS, 2022).

Define-se, então, a integral de luz diária do plantio necessária para realizar a suplementação de luz. Tal fator deve ser fornecido pelo produtor rural. Para o caso da soja, é necessário 100MJ a mais de energia durante o estágio reprodutivo, que dura em média 60 dias. Dessa forma, com as devidas conversões de potência, obtém-se a energia diária a ser utilizada, conforme a Equação (10) e a Equação (11) (FERREIRA et al., 2015; ZORZETO et al., 2014).

$$\frac{E}{m^2} = \frac{100MJ}{60dias} \quad (10)$$

$$P = \frac{PPF}{\eta_{PAR}} \quad (11)$$

$$\frac{E}{m^2} = \frac{100MJ}{60.10 h \cdot \frac{60min}{h} \cdot \frac{60s}{min}}$$

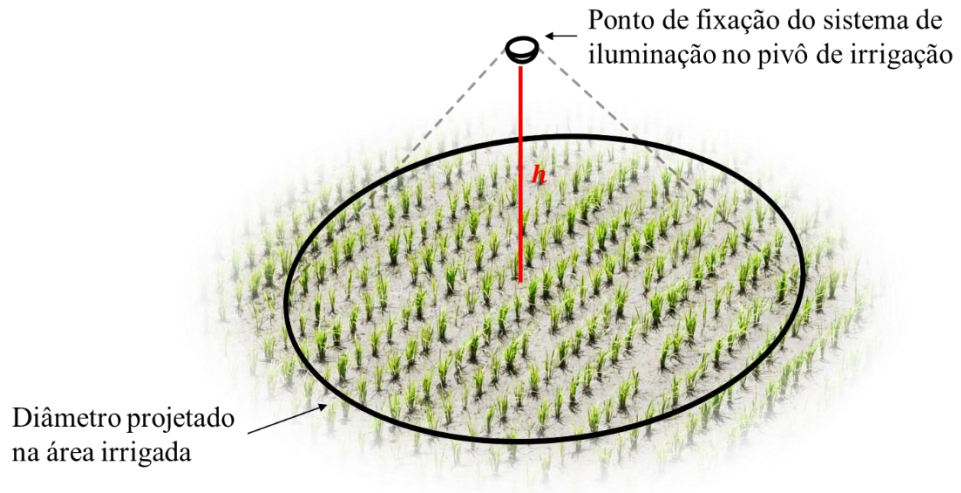
$$\frac{E}{m^2} = \frac{46,3 \frac{J}{s}}{m^2}$$

Brevemente, a aquisição do valor de DLI é obtido através da compensação dos valores históricos de radiação solar, segundo o atlas de energia solar, nos meses do plantio, conforme (INPE, 2017). Sendo assim possível definir a dose diária de suplementação de luz solar a partir de aspectos construtivos do pivô de irrigação.

Assim, é possível obter o PPF necessário para a suplementação de acordo com a eficácia do fóton do LED escolhido, conforme Equação (9). Com esses fatores definidos, deve-se agora calcular a área a ser irrigada, a depender de fatores como: velocidade do pivô, altura de instalação do sistema de iluminação e ângulo de distribuição da intensidade luminosa.

Ilustra-se, na Figura 34, os principais parâmetros relacionados ao sistema de iluminação no pivô de irrigação, bem como a obtenção da área irrigada, conforme o diâmetro que a fonte de luz projeta na superfície, considerando uma emissão em 120° .

Figura 34 – Diâmetro projetado na área irrigada



Fonte: Autor.

Dessa forma, o diâmetro do plantio iluminado D_P pode ser definido pela Equação (12), onde h é a altura de instalação e α_{LED} o ângulo de distribuição de luz do LED.

$$D_P = 2 h \operatorname{tg}(\alpha_{LED}) \quad (12)$$

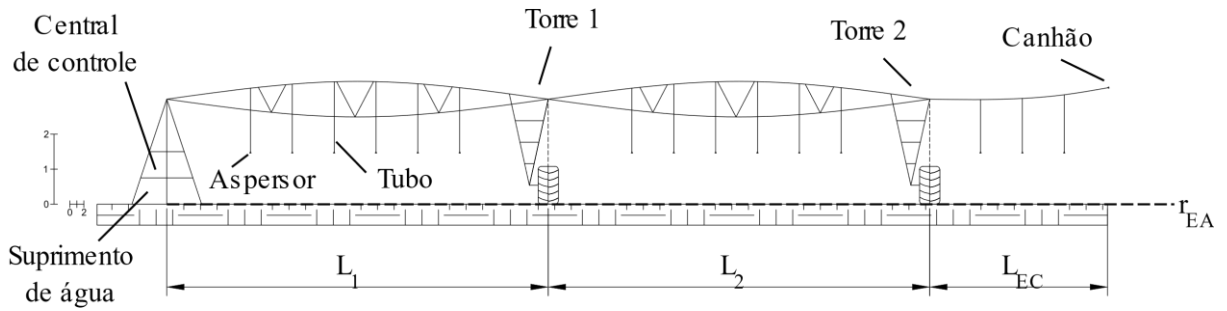
Refere-se a Equação (6) para obter o PPF necessário à altura de instalação para manter o valor requerido de integral de luz diária, tendo em vista que a energia necessária aumenta com o quadrado da distância entre a fonte de luz e o plantio. Assumindo eficácia típica do LED de $1,9 \mu \text{mol } J^{-1}$ e utilizando a Equação (11), obtém-se o valor de PPF de $87,9 \mu \text{mol } s^{-1}$.

Obtendo o PPF necessário em relação à altura de instalação, deve-se então definir o tempo de exposição médio do cultivo a suplementação de luz. Para tal, considera-se a velocidade mínima e máxima do pivô central, fornecido pelo fabricante deste. Assim, é possível obter a exposição mínima ex_{min} e a exposição máxima ex_{max} de acordo com as variáveis apresentadas na Figura 35.

$$ex_{min} = 2\pi \frac{L_1}{v_1} \quad (13)$$

$$ex_{max} = 2\pi \frac{L_{EC}}{v_{EC}} \quad (14)$$

Figura 35 – Variáveis do pivô de irrigação



Fonte: Autor.

O tempo para uma volta completa de pivôs centrais comerciais está entre sete e nove horas. É utilizado o pivô com a primeira torre em 54,7 m e comprimento total de 134,9 m. Obtendo, assim, um tempo de exposição mínima de 3,47 minutos e um tempo de exposição máxima de 8,55 minutos.

4.3 CONCLUSÕES PARCIAIS

A partir das características apresentadas durante o projeto e do dimensionamento do sistema de iluminação artificial em pivôs de irrigação para complementar a luz do sol, é apresentada uma das principais contribuições do presente trabalho. Por meio da caracterização da fonte de luz, são revisados os aspectos radiométricos e equipamentos necessários para a aquisição dos parâmetros do projeto.

5 EXPERIMENTOS DE VALIDAÇÃO

Este capítulo apresenta os experimentos realizados para a validação e comprovação da metodologia de projeto utilizada na especificação e na modelagem do sistema. De maneira geral, a intenção dos experimentos é evidenciar a influência da luz artificial na suplementação da luz solar no cultivar de soja.

São mostrados a seguir os dois principais experimentos realizados. No primeiro, é realizada a suplementação da luz durante 24 horas por dia durante um mês, no estágio reprodutivo, de R5 a R7. Como não há informações claras sobre o estágio ideal de desenvolvimento para iniciar a suplementação de luz, a abordagem escolhida foi de se iniciar os experimentos durante o estágio reprodutivo R1. No entanto, é importante notar que para garantir a maturação adequada da planta, a suplementação de luz deve ser encerrada no estágio R7.

Já no segundo experimento, é realizada a definição das áreas influenciadas pela irrigação de água e pela radiação emitida dos módulos de LED durante o período lunar em uma área de 0,3 hectare. Os experimentos foram realizados na mesorregião Centro Ocidental Rio-grandense, a 29°43'23"S, 53°43'15"W, na altitude de 95 m.

5.1 EXPERIMENTO 1 – SUPLEMENTAÇÃO 24 HORAS R5 – R8

Neste primeiro experimento, visa-se a validação da fonte de luz de forma qualitativa, estimando-se que haja o estímulo da reprodução e da geração excedente de vagens durante os estágios reprodutivos R5 a R8, onde há a maior influência da suplementação da radiação no incremento da produtividade dos cultivares. Estima-se que o valor de PPF esteja no limiar de ativação dos fotorreceptores do grão de soja, visto que está abaixo dos $90,2 \mu mol s^{-1}$ previamente estimados para a suplementação da DLI.

O experimento ocorreu durante o mês inteiro de fevereiro, 2021, mantendo a fonte de luz ligada 24 horas por dia, utilizando um terreno de quatro metros por oito metros com plantio de soja, onde foi instalado uma fonte de luz de $45 \mu mol s^{-1} m^{-2}$ a um metro de altura do plantio. Apenas parte do plantio de soja foi iluminado, viabilizando a comparação entre os plantios que foram influenciados pela luminária com os plantios que não tiveram suplementação de luz. A área do experimento é mostrada na Figura 36.

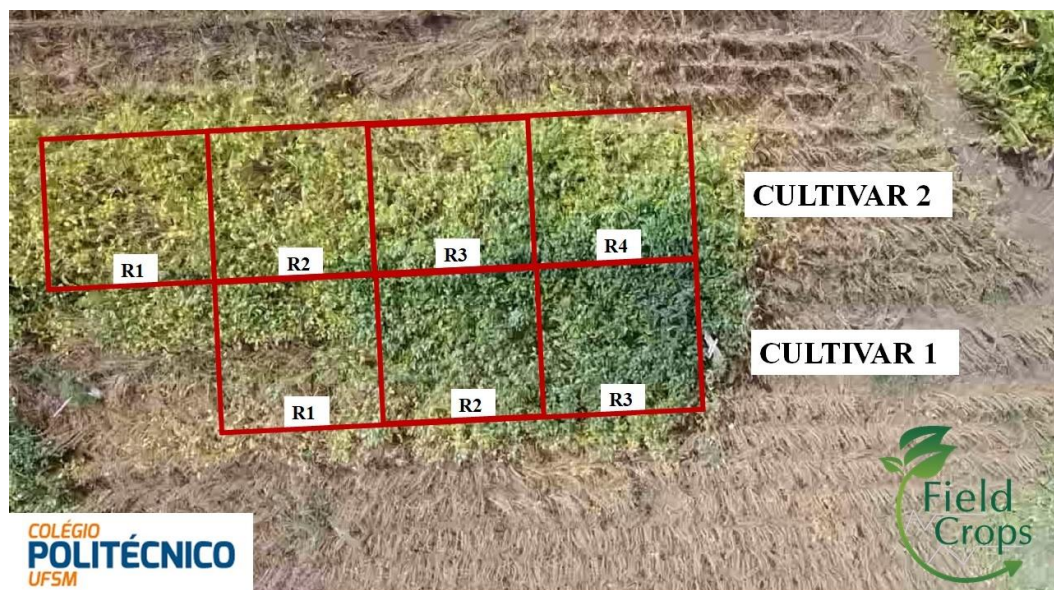
Figura 36 – Localização do experimento 1



Fonte: Autor.

Como resultado, a Figura 37 mostra que os cultivares mais próximos a fonte de luz não ultrapassaram as fases de reprodução até chegarem à maturação dos grãos, R8. Indicando, assim, que a fonte de luz estimulou a produção dos grãos, mas também sinalizou que havia e incentivo da luz artificial que não causasse a maturação do plantio.

Figura 37 – Resultado qualitativo do experimento 1



Fonte: Autor.

Embora se tratar de um experimento que não remete a um caso real, comprova-se que o valor de PPFD de $45 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ está minimamente no limite necessário para manter os estômatos abertos, de forma a realizar a fixação de carbono. Podendo, dessa forma, produzir mais sementes com a extensão do estágio de floração nos períodos R1 a R4. Tal característica corrobora para a continuação experimentos para a validação da metodologia proposta.

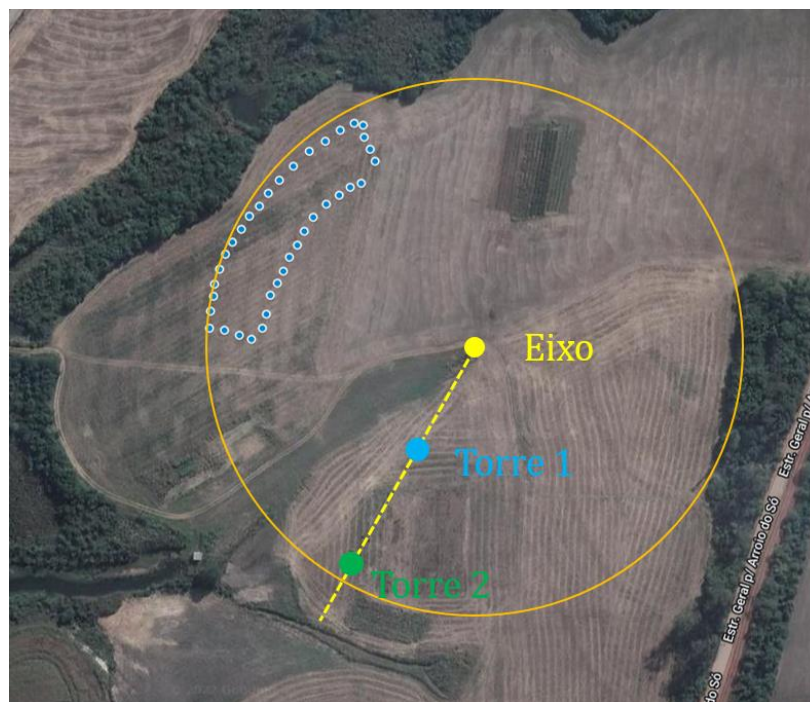
5.2 EXPERIMENTO 2 – SUPLEMENTAÇÃO R5 – R8

Neste segundo experimento, estima-se a obtenção de resultados de iluminação suplementar que estejam próximos das aplicações reais, ou seja, quando as luminárias estejam acopladas ao conjunto de irrigação de pivôs centrais. Conforme visto na seção 4.1.4, o tempo de exposição é variável e depende diretamente do comprimento e do tempo para uma volta completa dos pivôs centrais.

Sendo assim, para um comprimento médio de 150 metros, realizando uma volta completa em oito horas, o tempo de exposição a luz suplementar varia de três minutos a dez minutos, a depender da proximidade da luminária em relação ao eixo central. Ainda, por não existirem evidências do melhor estágio de desenvolvimento para se iniciar a suplementação de luz, opta-se por começar os experimentos no estágio reprodutivo R1. No entanto, sabe-se que, para que haja a maturação do plantio, a suplementação deve ser interrompida no estágio R7.

Dessa forma, delimitam-se áreas de estudo com diferentes tempos de exposição à iluminação adicional, sendo aplicadas em diferentes estágios de desenvolvimento do plantio. Para isso, são consideradas duas fontes de luz de $45 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$, instaladas a 2,7 metros do plantio e separadas em 15 metros, como mostra a Figura 38.

Figura 38 – Imagem aérea do plantio do experimento 2

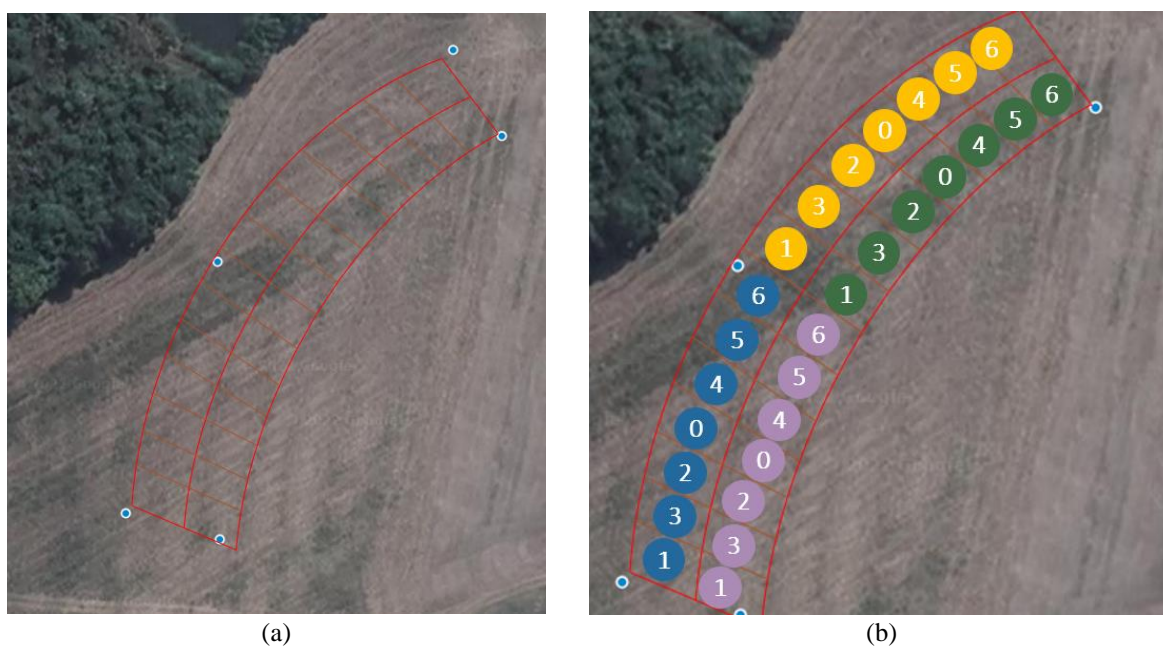


Fonte: Autor.

Portanto, tem-se uma área de irrigação proposta de 2800 m², divididas em 28 seções de 100 m², conforme Figura 39. É observado o comportamento do plantio de outubro de 2021 até o momento da colheita, em fevereiro de 2022, realizando a quantificação dos nós do cultivar de soja e a análise diária das características fisiológicas.

Com o objetivo de se realizar medidas fenológicas para quatro repetições das categorias experimentadas: grupo 0: testemunhas sem suplementação de luz; grupo 1: suplementação de luz por 10 minutos de R1 a R7; grupo 2: suplementação de luz por 10 minutos de R3 a R7; grupo 3: suplementação de luz por 10 minutos de R5 a R7; grupo 4: suplementação de luz por 5 minutos de R1 a R7; grupo 5: suplementação de luz por 5 minutos de R3 a R7; grupo 6: suplementação de luz por 5 minutos de R5 a R7. A Tabela 3 resume os grupos com os diferentes parâmetros de suplementação a serem experimentados.

Figura 39 – Demarcação das áreas do experimento 2



Fonte: Autor.

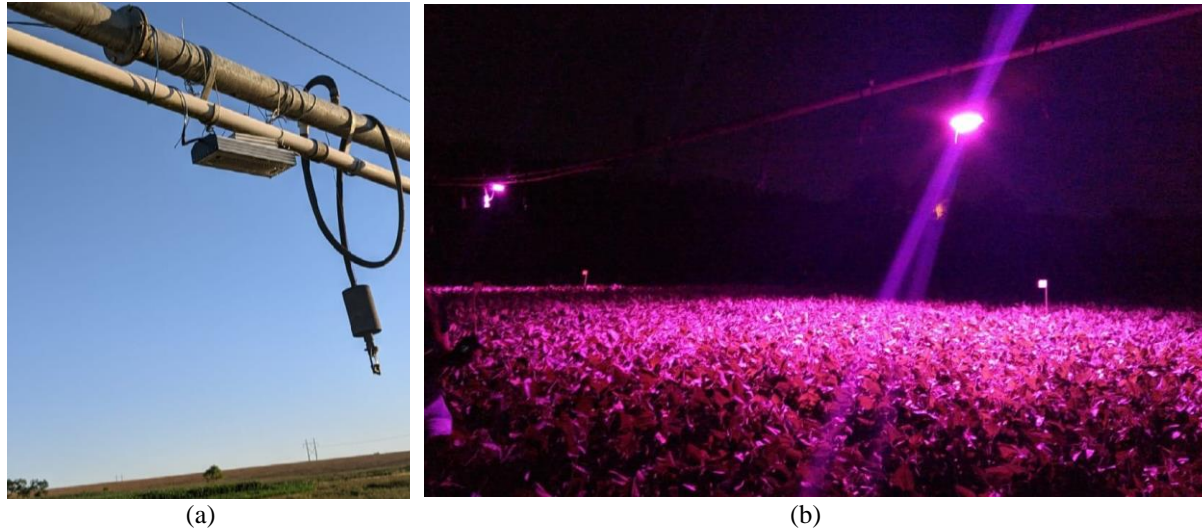
Tabela 3 – Divisão dos grupos em relação à suplementação e ao estágio de desenvolvimento

Grupo	Suplementação de luz por dia	Início da suplementação de luz
Controle (T0)	Sem suplementação	Sem suplementação
Grupo 1 (T1)	10 minutos	R1
Grupo 2 (T2)	10 minutos	R3
Grupo 3 (T3)	10 minutos	R5
Grupo 4 (T4)	5 minutos	R1
Grupo 5 (T5)	5 minutos	R3
Grupo 6 (T6)	5 minutos	R5

Fonte: Autor.

A Figura 40 mostra a instalação da luminária proposta e como é o comportamento da mesma durante o experimento. Já na Figura 41, é possível verificar o avanço do plantio durante safra de 2021, indo do estágio de floração até o estágio final de maturação.

Figura 40 – Instalação da fonte de luz (a); luminária ligada no período noturno (b)



Fonte: Autor.

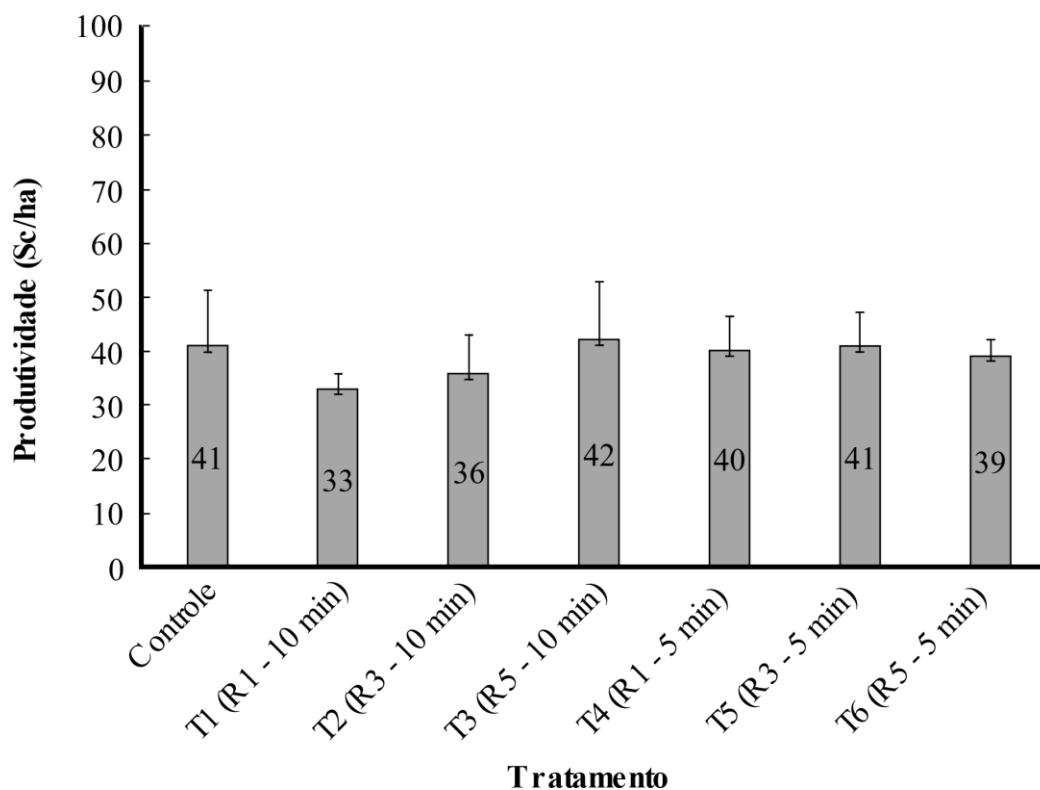
Figura 41 – Evidências da mudança de estágios – R5 (a) e R8 (b) – do plantio no experimento 2



Fonte: Autor.

A Figura 42 mostra a produtividade, obtida em Sacas por hectare, medida após a secagem dos grãos e realizando a pesagem da massa seca. Ao analisar os resultados, nota-se que, devido a um período de seca severa durante os estágios mais críticos para o desenvolvimento do plantio, o estágio reprodutivo, a soja muitas vezes não atingiu a absorção diária de água necessária para que o efeito da suplementação de luz fosse quantificado.

Figura 42 – Produtividade por grupos do experimento



Fonte: Autor.

Devido a umidade do solo estar baixa, os fotossistemas não foram ativados de modo a agir na fixação de carbono e na assimilação de nutrientes. Tal ação levaria a não compensação do balanço energético do plantio ao realizar funções respiratórias com nutrientes em escassez. Assim, a produtividade foi comprometida e os efeitos da suplementação da luz solar com o uso da iluminação artificial não pode ser medida.

5.3 CONCLUSÕES PARCIAIS

Com os dois experimentos apresentados, é possível identificar os pontos positivos e negativos do emprego de sistemas de iluminação no cultivo do grão de soja. Devido a baixa disponibilidade hídrica da região durante a safra de 2021/2022, os resultados do experimento II foram inconclusivos. Devido a complexidade inerente do ambiente em que o sistema de iluminação está empregado, não foi possível determinar com assertividade quanto seria incrementado na produtividade do plantio.

Conforme visto anteriormente, uma alta produtividade pode ser atingida por não só um, mas por diversos fatores. Devido a interdisciplinaridade natural do estudo, é necessário o controle total do ambiente em que a atividade está inserida, seja tanto por previsões de níveis solares e de precipitação quanto pelo planejamento das ações de irrigação forçada e de suplementação de luz solar. Para maior controle das variáveis, faz-se necessário a utilização de equipamentos capazes de aferir as trocas gasosas durante o experimento, bem como o aumento da DLI suplementar para que seja suficiente para o plantio realizar a assimilação dos nutrientes do solo.

É previsto uma maior disponibilidade hídrica durante as próximas safras. Fator esse tão importante quanto a suplementação de luz do sol. Salienta-se a influência de uma possível inércia do plantio a partir do momento da radiação suplementar até a realização da fotossíntese.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As vantagens da utilização de LEDs com elevada eficácia, junto ao desenvolvimento de uma metodologia de projeto, indicam que é viável o uso de módulos que incorporam essa tecnologia. Respeitando normas ambientais e incentivos à sustentabilidade, faz-se necessária a correta implementação de sistemas de iluminação, tendo a eficiência energética como principal influência na proposta.

De forma a adequar-se a essas exigências, a modelagem de sistemas de iluminação considerando figuras de mérito da agricultura foi desenvolvida. Sendo necessário também um estudo que aponte os desafios e as oportunidades em sistemas de iluminação em estado sólido, expondo características chave para a compreensão dos conceitos de radiometria.

Aproveitando a estrutura mecânica e a instalação elétrica preexistente em pivôs de irrigação, propõe-se uma metodologia de projeto de sistemas de iluminação que suplementem a radiação solar, aumentando a produtividade de plantios de soja. O fluxograma de passos para a execução do projeto pode ser aplicado a cultivos semelhantes, desde que seja conhecida a fisiologia do cultivar para a correta caracterização da fonte de luz. Com as devidas adaptações, o estudo pode ser replicado a agricultura vertical ou utilizando estufas climáticas.

Conforme apresentado em experimentação, um projeto que leva em consideração somente a resposta do plantio à iluminação não é suficiente, sendo necessário o estudo multidisciplinar, unindo conceitos da agricultura, da óptica, da fotometria e da conservação de energia sob um contexto de desenvolvimento sustentável de sistemas de agricultura. Os resultados da primeira fase não foram completamente satisfatórios, tendo em vista que a escassez de água ocasiona na redução da produtividade dos plantios.

Outro experimento foi proposto durante a safra de 2022, porém a escassez de água foi mais uma vez o principal influenciador dos resultados. Existe a previsão da realização de um novo experimento na próxima safra, onde será monitorado a respiração celular através da troca de gases do plantio com o ambiente, além do maior controle nos níveis de água presente no cultivo.

Esses fatos demonstram uma das fraquezas da aplicação de LEDs na horticultura. Além de nem sempre suprirem a demanda imposta, podem causar o aumento do consumo energético com o aumento incerto da produtividade agrícola. Indicando, assim, a necessidade da análise de viabilidade comercial desses sistemas.

Além disso, o estudo proposto não seria possível de ser realizado sem o auxílio de especialistas em agronomia, trazendo os aspectos fisiológicos do plantio para as exigências dos

parâmetros de entrada do sistema de iluminação. Ainda, faz-se indispensável o uso de equipamentos capazes de aferir a respiração celular e a atividade dos estômatos durante a suplementação de luz artificial.

Portanto, levar em consideração fatores ambientais, como a umidade, a qualidade do ar, a intensidade da luz, a composição de nutrientes do solo e o tipo de luz é impreterível. Tais fatores possuem comportamentos distintos quanto à aplicação, seja em cultivos internos, com fatores controlados, ou em cultivos externos, onde o sistema de iluminação age como uma suplementação – em conjunto a luz solar.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Desenvolvimento e implementação de aplicativo em código aberto para auxílio ao produtor rural na escolha do sistema de iluminação artificial: faz-se necessária a educação do público geral quanto a importância da utilização correta de recursos globais e da sustentabilidade de atividades agrícolas. Dessa forma, um aplicativo para dispositivos móveis para auxiliar no projeto de pivôs de irrigação com iluminação artificial acoplada pode ser uma opção para fomentar boas práticas de cultivo.

Estudo e proposta de um dispositivo de instrumentação de baixo custo para aferimentos de trocas gasosas e resposta a iluminação de cultivos: a medição dos fatores ambientais que contemplam a plantação de qualquer cultivo é fundamental para a atuação correta no controle de produtividade e manutenção da qualidade na colheita. Equipamentos como o Licor LX6400XT são capazes de obter o fluxo de trocas gasosas e indicar uma possível diminuição na biomassa quando o cultivo não está produzindo corretamente devido a falta de nutrientes no solo, a falta de energia solar, ou a baixa dos recursos hídricos.

Utilização de aprendizado de máquina para processamento e controle de colheita considerando fatores de ambiência: estabelecer métodos de controle e alertas quanto a fatores externos que possam influenciar na produtividade, na redução da biomassa produzida ou na colheita antecipada do cultivo através da aquisição e do comissionamento de redes autônomas e descentralizadas para envio de pacotes de dados periódicos em lavouras desconectadas a rede de telefonia celular, como a *Helium network*.

6.2 PRODUÇÃO CIENTÍFICA

Artigo publicado no 17º Simpósio Internacional sobre Ciência e Tecnologia de Iluminação – LS17, realizado de forma remota na *Université Toulouse III – Paul Sabatier*, Toulouse, França.

VEGNER, I; BURIOL, G; DALLA COSTA, M. A; BALEST; D; STRECK, N. Horticulture LEDs in Soybean Outdoor Light Supplementation – a Case Study. EEDAL-LS-2022: International Conference on Energy Efficiency in Domestic & Light Sources.

REFERÊNCIAS

AGRIC. **Cultivo da soja | Agric.com.br.** Disponível em: <https://agric.com.br/producoes/cultivo_da_soja.html>. Acesso em: 15 abr. 2022.

AGRIVI. **Center Pivot Irrigation: History | Parts | Application.** Disponível em: <<https://www.agrivi.com/blog/center-pivot-system-an-efficient-and-economical-solution-for-irrigation/>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

ANPO, M.; FUKUDA, H.; WADA, T. **Plant factory using artificial light: adapting to environmental disruption and clues to agricultural innovation.** [s.l.] Elsevier, 2018.

ASHDOWN, I. **Photometry and Photosynthesis: From Photometry to PPF (Revised)** Photometry and Photosynthesis. n. November, 2015.

ASHDOWN, I.; DESIGN, H. L. **In Search of Luminance: Understanding What We See In Search of Luminance.** Disponível em: <www.agi32.com/blog>.

BASS, M. **Handbook of Optics Vol2 - Design, Fabrication and Testing; Sources and Detectors; Radiometry and Photometry.** New York: McGraw-Hill Professional, 2010.

BLANKENSHIP, R. E. **Molecular mechanisms of photosynthesis.** [s.l.] John Wiley & Sons, 2021.

C C BLACK, J. **Photosynthetic Carbon Fixation in Relation to Net CO₂ Uptake.** <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.pp.24.060173.001345>, v. 24, n. 1, p. 253–286, 28 nov. 2003.

CARVALHO, L. V. S. et al. **Discursos sobre tecnologias de desinfecção pós-pandêmicas: luz ultravioleta germicida, fotocatalise e ozônio.** *Revista de Casos e Consultoria*, v. 13, n. 1, p. e27985–e27985, 2022.

CHEN, R. et al. **Effects of light quality on growth and quality of lettuces in hydroponic.** **2015 12th China International Forum on Solid State Lighting, SSLCHINA 2015**, p. 154–156, 2015.

CHIES, L. **Aprimoramento da estimativa do fluxo luminoso e metodologia de projeto para sistemas de iluminação que utilizam diodos emissores de luz.** Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 31 mar. 2016.

CHO, J. et al. White light-emitting diodes: History, progress, and future. **Laser & Photonics Reviews**, v. 11, n. 2, p. 1600147, mar. 2017.

CIE. **Horticultural Lighting - The Root to International Standards — LED professional - LED Lighting Technology, Application Magazine**. Disponível em: <<https://www.led-professional.com/resources-1/standardization/horticultural-lighting-the-root-to-international-standards>>. Acesso em: 17 fev. 2021.

COMPRES RURAL. **Irrigação de Luz: Primeiro sistema de pivô iluminado do mundo — CompreRural**. Disponível em: <<https://www.comprerural.com/irrigacao-de-luz-primeiro-sistema-de-pivo-iluminado-do-mundo/>>. Acesso em: 8 set. 2023.

CONNOR, D. J.; LOOMIS, R. S.; CASSMAN, K. G. **Crop ecology: Productivity and management in agricultural systems**. [s.l.: s.n.].

DEBAUCHE, O. et al. **Irrigation pivot-center connected at low cost for the reduction of crop water requirements**. 2018 International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet). **Anais...IEEE**, abr. 2018.

DIN. **DIN 5031-10. Optical radiation physics and illuminating engineering - Part 10: Photobiologically effective radiation, quantities, symbols and action spectra**. [s.l.: s.n.].

DOE. **SSL Manufacturing Status & Opportunities**. 2022a.

DOE. **2022 Solid-State Lighting R&D Opportunities**. [s.l.: s.n.].

DORAIS, M. **The use of supplemental lighting for vegetable crop production: light intensity, crop response, nutrition, crop management, cultural practices**. Canadian Greenhouse Conference. **Anais...2003**.

DUTTA GUPTA, S.; AGARWAL, A. Artificial Lighting System for Plant Growth and Development: Chronological Advancement, Working Principles, and Comparative Assessment. **Light Emitting Diodes for Agriculture: Smart Lighting**, p. 1–25, 25 out. 2017.

ELKINS, C.; VAN IERSEL, M. W. Longer Photoperiods with the Same Daily Light Integral Increase Daily Electron Transport through Photosystem II in Lettuce. **Plants**, v. 9, n. 9, p. 1172, 10 set. 2020.

EMBRAPA. **Sistema de Análise Temporal da Vegetação: SATVeg**.

EVANS, R. G. Center pivot irrigation. **Agricultural Systems Research Unit, North Plain Agricultural Research laboratory. USDN-Agricultural Research Service**, v. 1500, 2001.

FANCELLO, G.; PADDEU, D.; FADDA, P. Investigating last food mile deliveries: A case study approach to identify needs of food delivery demand. **Research in Transportation Economics**, v. 65, p. 56–66, 1 out. 2017.

FAO. Tracking progress on food and agriculture-related SDG indicators 2020. p. 76, 2020.

FERREIRA, E. A. et al. Aspectos fisiológicos de soja transgênica submetida à competição com plantas daninhas. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 58, n. 2, p. 115–121, 2015.

GAN, P. et al. Chloroplasts— Beyond Energy Capture and Carbon Fixation: Tuning of Photosynthesis in Response to Chilling Stress. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, n. 20, p. 5046, 11 out. 2019.

GARDNER, M. J. et al. How plants tell the time. **Biochemical Journal**, v. 397, n. 1, p. 15–24, 1 jul. 2006.

GESSMANN, TH.; SCHUBERT, E. F. High-efficiency AlGaInP light-emitting diodes for solid-state lighting applications. **Journal of Applied Physics**, v. 95, n. 5, p. 2203–2216, mar. 2004.

GRISA, C.; SCHNEIDER, S. “Plantar pro gasto”: a importância do autoconsumo entre famílias de agricultores do Rio Grande do Sul. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 46, n. 2, p. 481–515, jun. 2008.

GSA. **Global Solar Atlas**. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/detail?r=BRA>>. Acesso em: 20 ago. 2022.

HART, J. W. **Topics in Plant Physiology. 1. Light and plant growth**. Unwin Hyman Ltd., London, UK, , 1988.

HARUN, A. N. et al. **Red and blue LED with pulse lighting control treatment for Brassica chinensis in Indoor farming**. 2013 IEEE Conference on Open Systems (ICOS). **Anais...2013. História - Portal Embrapa**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/web/portal/soja/cultivos/soja1/historia>>. Acesso em: 20 ago. 2022.

IAC. II Urban Farming Workshop. 10 maio 2022.

IBGE. **EstatGeo 2020 - Soja Produzida na Região Sul**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <estatgeo.ibge.gov.br/EstatGeo2020>. Acesso em: 31 jul. 2022.

INPE. **Atlas Brasileiro de Energia Solar 2017 Base de Dados**. [s.l: s.n.].

JIANG, J.; MOALLEM, M. **Development of an Intelligent LED Lighting Control Testbed for IoT-based Smart Greenhouses**. IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. **Anais...out**. 2020.

KADRY, S. Symbols and Special Numbers. **Mathematical Formulas for Industrial and Mechanical Engineering**, p. 1–16, 2014.

KUMARI, B.; KUMAR, A. IOT based precision horticulture in North India. **Proceedings of the 3rd International Conference on Contemporary Computing and Informatics, IC3I 2018**, p. 7–12, 2018.

KUSUMA, P.; PATTISON, P. M.; BUGBEE, B. From physics to fixtures to food: current and potential LED efficacy. **Horticulture Research**, v. 7, n. 1, 2020.

KUSUMA, P.; PATTISON, P. M.; BUGBEE, B. Photon efficacy in horticulture. Em: **Plant Factory Basics, Applications and Advances**. [s.l.] Elsevier, 2022. p. 115–128.

LAI, Y. **The Light Measurement Handbook**. [s.l: s.n.].

LEDIL. PRODUCT DATASHEET CS16619_DAHLIA-TL110 DAHLIA-TL110. 2018a.

LEDIL. **GUIDE FOR HORTICULTURAL LIGHTING OPTICS**. Disponível em: <https://www.ledil.com/wp-content/uploads/2018/05/Guide_for_Horticultural_lighting_optics_WEB_v.1.0.pdf>.

LEDYI. **How to Read the Integrating Sphere Test Report - LEDYi Lighting**. Disponível em: <<https://www.ledyilighting.com/how-to-read-the-integrating-sphere-test-report/>>. Acesso em: 3 maio. 2023.

LEE, K.; ELLIOTT, C.; PATTISON, M. Energy Savings Potential of SSL in Horticultural Applications. **U.S. Department of Energy**, n. December, 2020.

LI, R. et al. Effects of Different Ratios of Red and Blue Light on the Morphology and Photosynthetic Characteristics of *Anoectochilus roxburghii*. **2019 16th China International Forum on Solid State Lighting and 2019 International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China, SSLChina: IFWS 2019**, n. 500, p. 116–120, 2019.

LI, S. et al. Estimating the contribution of plant traits to light partitioning in simultaneous maize/soybean intercropping. **Journal of Experimental Botany**, v. 72, n. 10, p. 3630–3646, 2021a.

LI, S. et al. Estimating the contribution of plant traits to light partitioning in simultaneous maize/soybean intercropping. **Journal of Experimental Botany**, v. 72, n. 10, p. 3630–3646, 4 maio 2021b.

LOPEZ, R. G.; RUNKLE, E. S. Photosynthetic Daily Light Integral during Propagation Influences Rooting and Growth of Cuttings and Subsequent Development of New Guinea Impatiens and Petunia. **HortScience**, v. 43, n. 7, p. 2052–2059, 1 dez. 2008.

LUMILEDS. **Luxeon SunPlus 2835 Line**. . Acesso em: 4 abr. 2023.

MCCREE, K. J. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. **Agricultural Meteorology**, v. 9, p. 191–216, jan. 1971.

MENEGAES, J. F. et al. Produção sustentável de alimentos em cultivo hidropônico. **Revista Monografias Ambientais**, v. 14, n. 3, p. 102–108, 28 set. 2015.

MIT. **Overview - Open Agriculture (OpenAg)**. Disponível em: <<https://www.media.mit.edu/groups/open-agriculture-openag/overview/>>. Acesso em: 2 set. 2022.

MONTERO, J. I. et al. GREENHOUSE ENGINEERING: NEW TECHNOLOGIES AND APPROACHES. **Acta Horticulturae**, n. 893, p. 51–63, abr. 2011.

MORGAN PATTISON, P.; HANSEN, M.; TSAO, J. Y. LED lighting efficacy: Status and directions. **Comptes Rendus Physique**, v. 19, n. 3, p. 134–145, mar. 2018.

NASA. **Crop Circles in Sharq El Owainat**. Disponível em: <<https://visibleearth.nasa.gov/images/90937/crop-circles-in-sharq-el-owainat/90939w>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

NELSON, D. L.; COX, M. M. **Princípios de bioquímica de Lehninger, 6 Ed.** [s.l: s.n.].

ORSINI, F. et al. Sustainable use of resources in plant factories with artificial lighting (PFALs). **European Journal of Horticultural Science**, v. 85, n. 5, p. 297–309, 2020.

OSRAM. **LEDs for Horticulture Lighting | OSRAM.** Disponível em: <<https://www.osram.com/os/applications/horticulture-lighting/index.jsp>>. Acesso em: 9 set. 2023.

PARK, Y.; RUNKLE, E. S. Far-red radiation promotes growth of seedlings by increasing leaf expansion and whole-plant net assimilation. **Environmental and Experimental Botany**, v. 136, p. 41–49, abr. 2017.

PATTISON, M. et al. Lighting R&D Opportunities (No. DOE/EE-2008). **Solid State Lighting Solutions (SSLS) Inc.: Santa Barbara, CA, USA**, 2019.

PAUCEK, I. et al. LED lighting systems for horticulture: Business growth and global distribution. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 18, p. 1–19, 2020.

PINK FARMS. **Pink Farms.** Disponível em: <<https://pinkfarms.com.br/>>. Acesso em: 3 set. 2022.

PIVOTO, D. et al. Scientific development of smart farming technologies and their application in Brazil. **Information Processing in Agriculture**, v. 5, n. 1, p. 21–32, mar. 2018.

RAVEN, P. H. et al. **Biology of plants.** [s.l.] Macmillan, 2005.

REVISTA HIDROPONIA. **Acompanhamento de produção de alface hidropônica em São Borja (RS) - Revista Hidroponia.** Disponível em: <[https://revistahidroponia.com.br/artigos_cientificos/28984/Acompanhamento-de-producao-de-alface-hidroponica-em-Sao-Borja-\(RS\)](https://revistahidroponia.com.br/artigos_cientificos/28984/Acompanhamento-de-producao-de-alface-hidroponica-em-Sao-Borja-(RS))>. Acesso em: 31 ago. 2022.

RITZ, T.; DAMJANOVIĆ, A.; SCHULTEN, K. The Quantum Physics of Photosynthesis. **ChemPhysChem**, v. 3, n. 3, p. 243, 15 mar. 2002.

ROBERT A. ROHDE, C. B.-S. 3. 0 VIA W. C. **Solar spectrum en.svg - Wikimedia Commons.** Disponível em: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e7/Solar_spectrum_en.svg>. Acesso em: 13 ago. 2022.

RUNKLE, E. S.; HEINS, R. D. Specific Functions of Red, Far Red, and Blue Light in Flowering and Stem Extension of Long-day Plants. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 126, n. 3, p. 275–282, maio 2001.

S G TURNIPSEED, AND; KOGAN, M. Soybean Entomology. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.en.21.010176.001335>, v. 21, n. 1, p. 247–282, 28 nov. 2003.

SAATH, K. C. DE O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, n. 2, p. 195–212, jun. 2018.

SAGER, J. C. et al. Photosynthetic efficiency and phytochrome photoequilibria determination using spectral data. **Transactions of the ASAE**, v. 31, n. 6, p. 1882–1889, 1988.

SANTONI, F. et al. **GreenCube: microgreens cultivation and growth monitoring on-board a 3U CubeSat**. 2020 IEEE 7th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). **Anais...**jun. 2020.

SAVVAS, D. SW—Soil and Water: Automated Replenishment of Recycled Greenhouse Effluents with Individual Nutrients in Hydroponics by Means of Two Alternative Models. **Biosystems Engineering**, v. 83, n. 2, p. 225–236, 1 out. 2002.

SCHEEREN, B. R. et al. Qualidade fisiológica e produtividade de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 32, n. 3, p. 35–41, 2010.

SERVICE, P. S. UNIVERSITY. A. E. **Agronomy Guide**. [s.l.] Pennsylvania State University, College of Agriculture, Extension Service., 1962.

SHAILESH, K. R. **Energy efficient LED lighting design for horticulture**. 2019 1st International Conference on Advanced Technologies in Intelligent Control, Environment, Computing & Communication Engineering (ICATIECE). **Anais...IEEE**, mar. 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9063621/>>

SILVA, M. R. DA et al. Forecasting the rice yield in Rio Grande do Sul using the SimulArroz model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 57, 2022.

SILVA, E. **Luz artificial em pivô de irrigação promete aumento de produtividade - Revista Globo Rural | Feiras.** Disponível em: <<https://globorural.globo.com/Noticias/Feiras/noticia/2022/04/luz-artificial-em-pivo-de-irrigacao-promete-aumento-de-productividade.html>>. Acesso em: 3 abr. 2023.

SINGH, D. et al. LEDs for energy efficient greenhouse lighting. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 139–147, set. 2015.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 9, p. 1351–1359, set. 2006.

TAGLIAPIETRA, E. L. et al. Biophysical and management factors causing yield gap in soybean in the subtropics of Brazil. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 2, p. 1882–1894, 5 mar. 2021.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal .pdf**. 6th Editio ed. [s.l.] Artmed, 2007.

TANIYASU, Y.; KASU, M. Aluminum nitride deep-ultraviolet light-emitting p–n junction diodes. **Diamond and Related Materials**, v. 17, n. 7–10, p. 1273–1277, 1 jul. 2008.

TORRES, A. P.; LOPEZ, R. G. Commercial Greenhouse Production - Measuring daily light integral in a greenhouse. **Purdue extension**, p. 7, 2010.

UNITED NATIONS, DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS, P. D. The World's Cities in 2018. **The World's Cities in 2018 - Data Booklet (ST/ESA/SER.A/417)**, p. 34, 2018.

USDA. **Brazil: Oilseeds and Products Annual | USDA Foreign Agricultural Service.** Disponível em: <<https://www.fas.usda.gov/data/brazil-oilseeds-and-products-annual-6>>. Acesso em: 15 abr. 2022.

VAN GELDEREN, K.; KANG, C.; PIERIK, R. Light Signaling, Root Development, and Plasticity. **Plant Physiology**, v. 176, n. 2, p. 1049–1060, 1 fev. 2018.

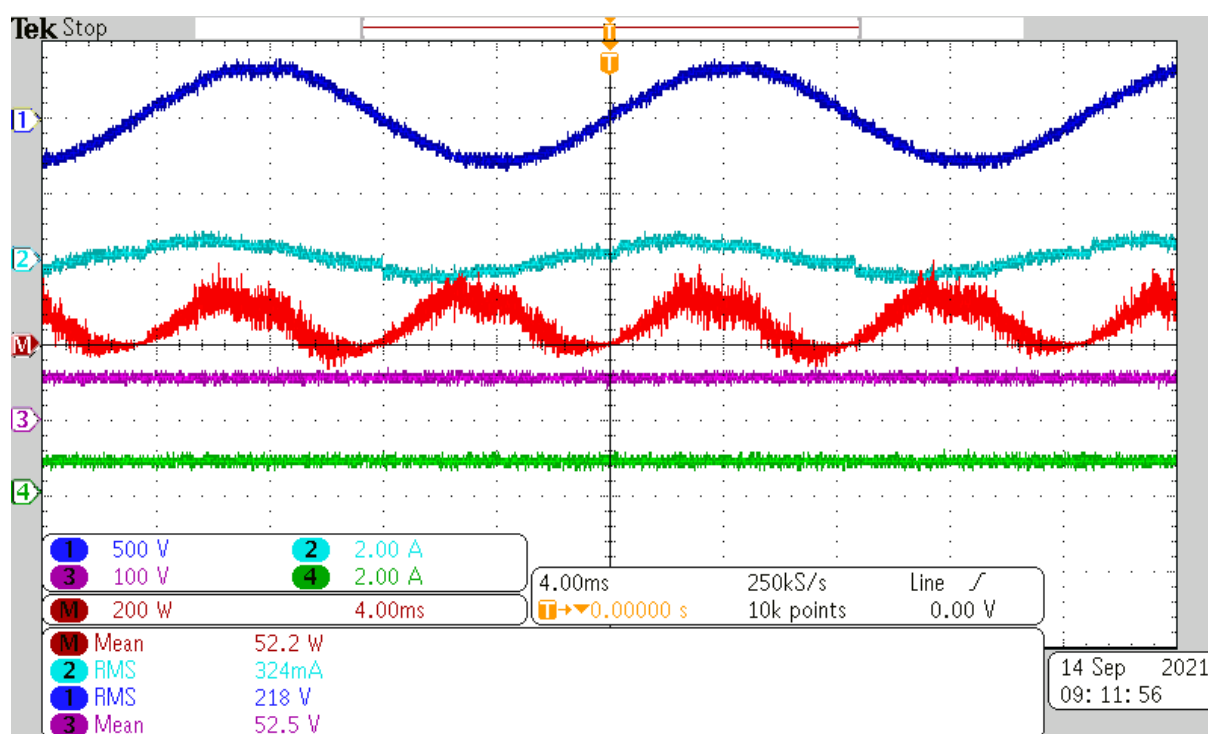
WEAVER, G.; VAN IERSEL, M. W. Longer photoperiods with adaptive lighting control can improve growth of greenhouse-grown 'Little Gem' lettuce (*Lactuca sativa*). **HortScience**, v. 55, n. 4, p. 573–580, 2020.

ZORZETO, T. Q. et al. Caracterização física de substratos para plantas. **Bragantia**, v. 73, n. 3, p. 300–311, 8 ago. 2014.

APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DA FONTE DE LUZ

Com equipamentos capazes de realizar a obtenção de dados elétricos e fotométricos de módulos de LED, faz-se necessária a conversão dos dados fornecidos em conceitos centrados ao olho humano para características que melhor relacionem o transporte de fótons para o plantio. Dessa forma, são apresentadas as medidas obtidas e convertidas, conforme Figura 43, Figura 44 e a Tabela 4.

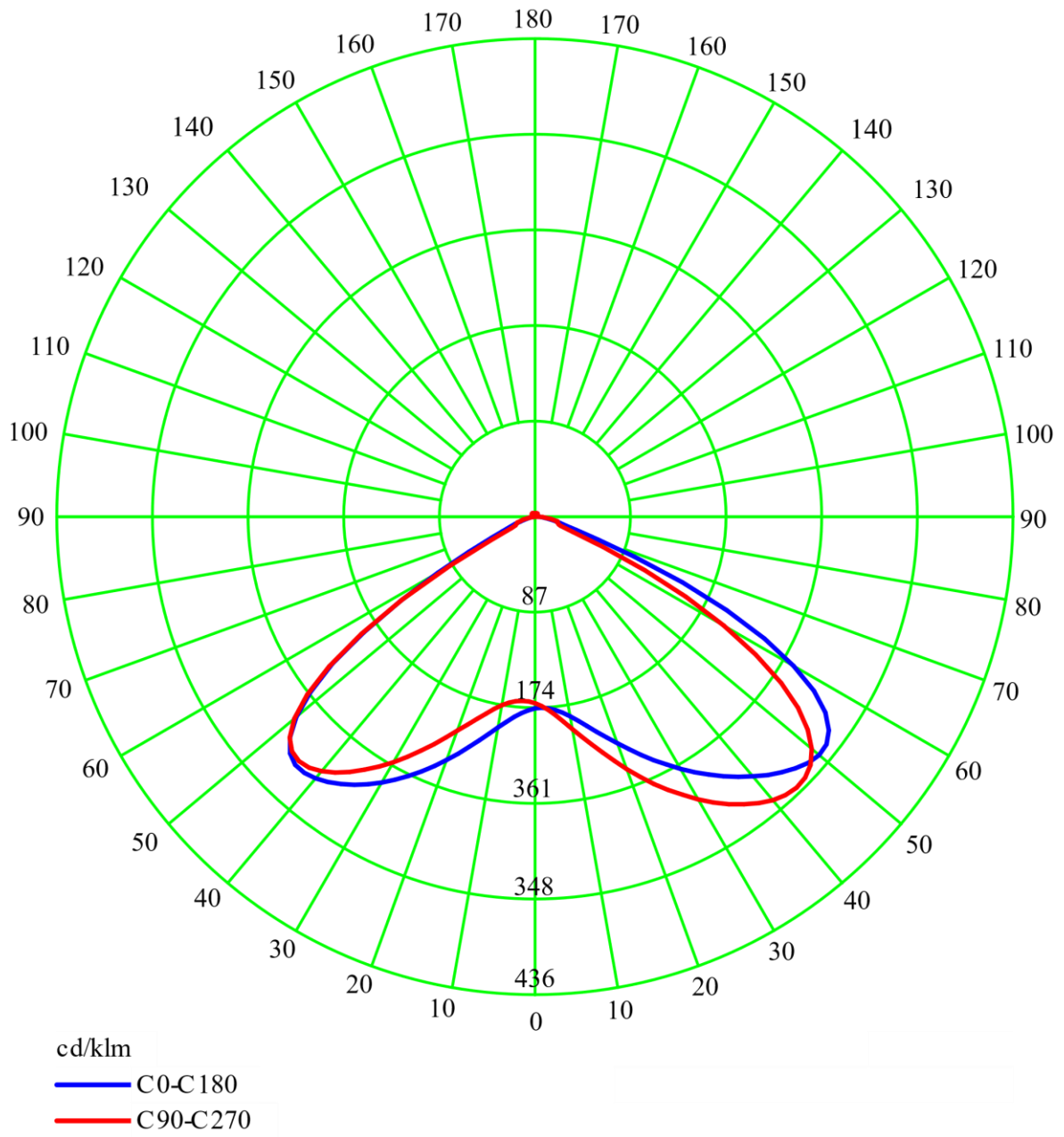
Figura 43 – Aquisição dos dados elétricos de entrada e saída do sistema de iluminação



Fonte: Autor.

Figura 44 – Distribuição de intensidade luminosa da luminária

Curva de Distribuição de Intensidade Luminosa (cd/klm)



Fonte: Autor.

Tabela 4 – Parâmetros elétricos obtidos através da medição no osciloscópio

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Frequência da rede elétrica	f	60	Hz
Tensão Eficaz de Entrada (valor RMS)	V_{IN}	218	V
Corrente de entrada (valor RMS)	I_{IN}	324	mA
Tensão de saída (valor médio)	V_{OUT}	52.5	V
Corrente de saída (valor médio)	I_{OUT}	1	A

Fonte: Autor.

APÊNDICE B – CARACTERÍSTICAS DO PIVÔ DE IRRIGAÇÃO

As características do pivô de irrigação são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros do pivô de irrigação disponibilizado para o experimento 2

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Altura livre entre torres	h	3	m
Primeiro lance	L_1	54,7	m
Segundo lance	L_2	109,4	m
Balanço	B	25,5	m
Comprimento até a última torre	L_N	109,4	m
Alcance efetivo do canhão	L_{EC}	32,43	m
Raio efetivo da área irrigada	r_{EA}	167,33	m
Área total irrigada	A_T	8,8	ha
Velocidade da última torre	v_2	253,4	m/h
Potência nominal do motor central	P_{MC}	12,5	cv
Rotação nominal do motor central	RPM	3500	RPM
Tensão nominal do motor central	V_{MOT}	380	V
Frequência de operação do motor central	f	60	Hz

Fonte: Autor.