

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
ENGENHARIA ELÉTRICA COM ÊNFASE EM SISTEMAS ELETRÔNICOS

Inah de Almeida Bossi Guimarães

**Análise e Dimensionamento de Sistema de Iluminação Artificial com LEDs para
Suplementação Luminosa no Cultivo de *Humulus lupulus***

Juiz de Fora

2017

Inah de Almeida Bossi Guimarães

**Análise e Dimensionamento de Sistema de Iluminação Artificial com LEDs para
Suplementação Luminosa no Cultivo de *Humulus lupulus***

Monografia apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica, área de concentração: Sistemas Eletrônicos, da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito para graduação no curso de Engenharia Elétrica.

Orientador: Professor Pedro Santos Almeida

Juiz de Fora

2017

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Guimarães, Inah.

Análise e Dimensionamento de Sistema de Iluminação Artificial com LEDs para Suplementação Luminosa no Cultivo de *Humulus lupulus* / Inah Guimarães. -- 2017.

100 p. : il.

Orientador: Pedro Almeida

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade

Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2017.

1. Luz Artificial. 2. Diodo Emissor de Luz. 3. Quantidades Radiométricas. 4. Drivers de LED. 5. Modelo foto-eleto-térmico. I.

Almeida, Pedro, orient. II. Título.


Inah de Almeida Bossi Guimarães

**Análise e Dimensionamento de Sistema de Iluminação Artificial com LEDs para
Suplementação Luminosa no Cultivo de *Humulus lupulus***

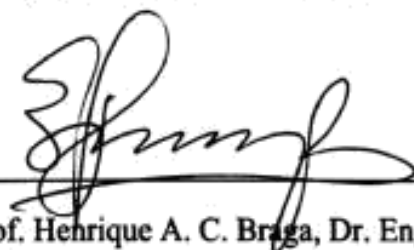
Monografia apresentada ao Programa de
Graduação em Engenharia Elétrica, área
de concentração: Sistemas Eletrônicos,
da Faculdade de Engenharia da
Universidade Federal de Juiz de Fora
como requisito para graduação no curso
de Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 07/12/17

BANCA EXAMINADORA



Prof. Pedro Santos Almeida, Dr. Eng. - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Henrique A. C. Braga, Dr. Eng.
Universidade Federal de Juiz de Fora



Eng. Pedro Laguardia Tavares
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me permitiu chegar aonde cheguei, e me dar força e esperança sempre quando precisei.

Agradeço aos meus pais por sempre me apoiar e acreditar nas minhas capacidades, nunca deixando de lado o carinho, proteção e amor.

Aos meus queridos irmãos, Ana Clara, Alberto e Beatriz que são fontes de apoio e alegria constante em minha vida, e quando alguma dificuldade surge, estão sempre disponíveis.

Ao Renan, pelos conselhos, incentivo, amor e companheirismo.

Aos meus Tios, Tias e vó, que sempre me apoiaram e me ajudaram no que era preciso.

Ao meu orientador Pedro Almeida e ao professor Henrique Braga, pela confiança depositada em mim e por me proporcionarem a oportunidade de fazer iniciação científica no NIMO, uma das melhores experiências da graduação.

Ao Pedro Laguardia, por compartilhar seu conhecimento e tempo para que este trabalho fosse possível.

A todos os meus amigos, aqueles de sempre e os que fiz durante a faculdade. A longa trajetória foi amenizada pelo companheirismo e bom humor de vocês.

A faculdade Waterford Institute of Technology na Irlanda por ter me dado uma visão mais ampla do curso, do mundo e de mim mesma.

A todos os professores que tive ao longo dessa caminhada, inclusive aqueles que dificultaram a mesma, mas principalmente aqueles que acreditaram no meu potencial.

A CAPES, a FAPEMIG, a Universidade Federal de Juiz de Fora e a Faculdade de Engenharia por todo o suporte e pelas ferramentas necessárias ao desenvolvimento deste trabalho.

*“If you go as far as you can see,
You will then see enough to go even farther”.*
John Wooden

RESUMO

O presente trabalho foi desenvolvido a partir da ideia inicial de se projetar uma luminária LED e seu respectivo *driver* de acionamento com dimerização de dois canais independentes para serem utilizados nos estudos de fisiologia vegetal envolvendo luz artificial. Da mesma maneira, foi visada também a sua futura utilização em estufas para comparação de luminária LED com vapor de sódio no desenvolvimento e crescimento do lúpulo (*Humulus lupulus*).

Para atingir os objetivos propostos este projeto analisa a interação entre a iluminação artificial e o cultivo de plantas, e também, um resumo sobre os diversos tipos de lâmpadas utilizadas para fisiologia vegetal em estufas, tanto como suplementos de luz natural ou como única fonte de iluminação em cultivos, dando ênfase para a iluminação de estado sólido. Assim, é proposto a produção de uma luminária de dois canais independentes com vinte LEDs vermelhos e oito LEDs azuis, e explicado a sua produção em relação a escolha do número, razão e espectro dos LEDs utilizados na composição da luminária. Esta ainda foi submetida a alguns experimentos radiométricos preliminares, analisando a viabilidade de sua utilização no sistema futuro proposto acima.

Os parâmetros medidos mais relevantes foram a PPFD e irradiação, considerando a altura da luminária com a planta, e o fluxo radiante. O objetivo é que o protótipo desenvolvido apresente um melhor crescimento do lúpulo quando comparado com a lâmpada de vapor de sódio, o que proporcionaria uma economia de energia para cultivos controlados.

Palavras-Chave: Iluminação Artificial. Quantidades Radiométricas. Diodos Emissores de luz. Lúpulo. Drivers de LED, Modelo foto-eleto-térmico

ABSTRACT

The present work was developed from the initial idea of designing a LED luminaire and its respective *drive* with dimerization of two channels which would be used in studies of plant physiology involving artificial light. In the same way, it was also aimed for a future use in greenhouses for comparison of LED luminaire with High Pressure Lamps (HPS) in the development and growth of hops (*Humulus lupulus*).

In order to achieve the proposed objectives, , this project analyzes the interaction between artificial lighting and plant cultivation, as well as a summary of the different types of lamps used for plant physiology in greenhouses, either as natural light supplement or as a single light source in crops, giving emphasis to solid state lighting. It is proposed the production of an independent two-channel luminaire with twenty red LEDs and eight blue LEDs, explained its production in relation to the choice of the number, reason and spectrum of the LEDs used in the composition of the luminaire. It was also submitted to some preliminary radiometric experiments, analysing the feasibility of its use in the future system proposed above.

The most relevant measured parameters were the PPFD and irradiation, considering the height of the luminaire with the plant, and the luminous flux. The goal was for the developed prototype to show better hop growth when compared to the sodium vapor lamp, which would provide energy savings for controlled crops.

Keywords: Artificial Lighting. Radiometric Quantities. Light Emitting Diodes.. Hop. LED drivers, photo-electro-thermal model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curva da resposta da luz fotossintética	18
Figura 2: Espectro de ação da câmara de crescimento.	20
Figura 3: Espectro de ação de campo.	21
Figura 4: Fotossíntese.	22
Figura 5: Comparação entre a sensibilidade da luz do olho humano e das plantas.....	23
Figura 6: Absorbância espectrais de fotopigmentos da fotossíntese	24
Figura 7: Curvas de resposta quântica	26
Figura 8: Lâmpada incandescente.	30
Figura 9: Lâmpadas fluorescentes.	30
Figura 10: Lâmpada fluorescente no crescimento de plantas em estufa fechada.	31
Figura 11: Lâmpada HPS	31
Figura 12: Lâmpadas HPS no crescimento de vegetais.....	32
Figura 13: Espectro de energia da lâmpada de vapor de sódio	33
Figura 14: Lâmpadas de LEDs no crescimento de vegetais	34
Figura 15: Eficácia luminosa.....	35
Figura 16: Polarização direta.....	36
Figura 17: Cor da luz emitida, Comprimento de onda, Energia de Fóton.....	37
Figura 18: LEDs indicativos.....	37
Figura 19: LEDs de alto brilho	38
Figura 20: LEDs de potência com diferentes encapsulamentos.	39
Figura 21: Imagem dos dois tipos de cultivo.....	44
Figura 22: Plantação de lúpulo.	47
Figura 23: Cones do lúpulo.	48
Figura 24: Maiores produtores de lúpulos no mundo.....	48
Figura 25: Arranjo interno (em estufa).....	50
Figura 26: Comparação entre absorvância relativa	53
Figura 27: O arranjo da luminária LED.....	56
Figura 28: Interações entre a grandeza térmicas, elétricas e fotométricas	58
Figura 29: Modelo eletrotérmico completo	60
Figura 30 : Curvas características de ambos os LEDs.....	63
Figura 31: Equipamentos necessários para medições PPFd	66
Figura 32: Arranjo experimental	66

Figura 33: Disposição de pontos de medição	67
Figura 34: Protótipo do arranjo do bloco de LED	67
Figura 35: PPFd médio para os ensaios realizados de variação de corrente e altura.....	69
Figura 36: Desvio cromático para ensaio a 100 cm de altura (a) e desvio cromático para ensaio a 50 cm de altura (b).....	70
Figura 37: Arranjo experimental com esfera integradora.....	71
Figura 38: Parâmetros elétricos e radiométricos medidos na esfera.	71
Figura 39: Resultado de distribuição espectral para discretização	72
Figura 40: Gráfico dos fluxos medidos e estimados em função da corrente.....	73
Figura 41: Luminária publica utilizada como refletor.....	74
Figura 42: Espectro de energia da lâmpada de vapor de sódio de 150W com refletor de rua e desvio cromático.....	74
Figura 43: Protótipo da nova lumina LED com 20 LEDs vermelhos e 8 LEDs azuis.....	76
Figura 44: Dois coolers acoplados a luminária LED.....	78
Figura 45: Gráfico dos dados da tabela 5, comparado com a extrapolação linear.	78
Figura 46: Gráfico dos dados da tabela 6, e sua estimativa de dados futuros. Erro! Indicador não definido.	
Figura 47: Ensaio da luminária nova dentro da esfera integradora.	80
Figura 48 Circuito prático do controle do inversor.	84
Figura 49: Formas de onda no circuito de controle.....	84
Figura 50: <i>Driver</i> para o canal vermelho na simulação do Psim.....	86
Figura 51: <i>Driver</i> para o canal azul na simulação do Psim.....	86
Figura 52: Formas de onda do <i>driver</i> para o canal vermelho.....	87
Figura 53: Formas de onda do <i>driver</i> para o canal azul.	88
Figura 54: Protótipo do <i>driver</i> feito.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre aspectos dos dois LEDs utilizados.....	55
Tabela 2: Parametros encontrados para LEDs azuis e vermelhos.....	64
Tabela 3: Dados de irradiância, PPFD e cromaticidade coletados do experimento com difusor cossenoidal.....	69
Tabela 4: Dados medidos e estimados do fluxo azul, vermelho e total do bloco de LED.....	74
Tabela 5: Dados de irradiância, PAR e cromaticidade coletados do experimento com difusor cossenoidal.....	78
Tabela 6: Dados de irradiância, PAR e altura coletados do experimento com difusor cossenoidal.....	80
Tabela 7: Dados do fluxo azul, vermelho e total.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PAR	Photosynthetically Active Radiation
CIE	Comission Internationale de L'Eclairage
PPF	Photosynthetic Photon Flux
PPFD	Photosynthetic Photon Flux Density
YPF	Yield Photon Flux
RQE	Relative Quantum Efficiency
FR	Far Red
HPS	High Pressure Lamps
NASA	National Aeronautics and Space Administration
LED	Light-emitting Diode
SSL	Solid-state lighting
LEDs HB	High Brightness LED
SPD	Sunlight Spectral Power Distribution
CCT	Correlated color temperature
PET	Photo-electro-thermal
SDP	Short-day-plants
PWM	Pulse Width Modulation
SSNR	Single Switch Nonresonant

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVO	15
1.2 TRABALHOS FUTUROS	16
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	17
2 ILUMINAÇÃO	18
2.1 RADIAÇÃO FOTOSSINTÉTICA ATIVA (PAR)	18
2.2 FOTOSSÍNTESE	21
2.3. FOTOSSISTEMAS	23
2.4. SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE LUZ.....	25
2.4.1 SISTEMA RADIOMÉTRICO	26
2.4.2 SISTEMA FOTOMÉTRICO	27
2.4.3 SISTEMA QUÂNTICO	27
2.4.4 SISTEMA FITOMÉTRICO	28
2.5 FONTES DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAIS UTILIZADAS NA HORTICULTURA	29
2.5.1 LÂMPADA INCANDESCENTE	29
2.5.2 LÂMPADA FLUORESCENTE	30
2.5.3 LÂMPADA DE VAPOR DE SÓDIO	31
2.6 DIODO EMISSOR DE LUZ (LED).....	34
2.6.1 TECNOLOGIA.....	34
2.6.2 FUNCIONAMENTO DO LED	36
2.6.3 CATEGORIA DOS LEDS	37
2.6.4 APLICAÇÃO DO LED PARA ILUMINAÇÃO EM ESTUFAS.....	39
3. ANÁLISE DE RESPOSTA FISIOLÓGICA DE PLANTAS EM DIFERENTES CENÁRIOS DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL	40

4 SOBRE O LÚPULO.....	47
5.ANÁLISE DA LUMINÁRIA LED	52
5.1 CONSIDERAÇÕES DO BALANÇO DE ESPECTRO	52
5.2 MODELO DE LEDS E ARRANJO UTILIZADO.....	54
5.3 PROJETO DA LUMINÁRIA	56
5.4 CONSIDERAÇÕES DO PERFIL TÉRMICO DO LED OBSERVADO EM EXPERIMENTOS EM LABORATÓRIO.....	56
5.5 CARACTERÍSTICAS DO LED E MODELO PET DO ARRANJO	58
6. SISTEMA EXPERIMENTAL DE MEDIÇÃO PARA AVALIAÇÃO DO ARRANJO DA LUMINÁRIA	65
6.1 ENSAIO COM O BLOCO.....	65
6.1.1 ENSAIO COM DIFUSOR COSSENOIDAL	65
6.1.2 ENSAIO COM ESFERA INTEGRADORA.....	70
6.2 ENSAIO PARA LÂMPADA DE VAPOR DE SÓDIO	73
6.3. ENSAIO PARA LAMPADA FLUORESCENTE	75
6.4. ENSAIO PARA NOVA LUMINÁRIA LED.....	75
6.4.1 ENSAIO COM DIFUSOR COSSENOIDAL	76
6.4.2 ENSAIO COM ESFERA INTEGRADORA.....	79
7. <i>DRIVER</i>	82
7.1 SIMULAÇÃO DO <i>DRIVER</i>	85
8 CONCLUSÃO	89
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
10 ANEXO.....	96
Datasheet LED vermelho.....	96
Datasheet LED Azul.....	98

1 INTRODUÇÃO

A agricultura é uma das necessidades cruciais da vida, pois fornece alimento para nós, seres humanos, e animais. Como modo de aperfeiçoar as condições para o cultivo das plantas, foram criadas as estufas, a qual recria um ambiente onde a temperatura, umidade e luz são monitoradas e controladas. A luz é o principal instrumento para a realização da fotossíntese. Com a tecnologia atual tem-se utilizado luzes artificiais para poder simular a luz do sol e estimular a fotossíntese nas plantas através da emissão de um espectro eletromagnético apropriado e, assim, gerar um aumento na produtividade e qualidade de plantas, além de ser usada para compensar ou para substituir a baixa disponibilidade de luz natural em determinadas regiões. É de extrema importância como selecionar a fonte de luz e otimizar o sistema de iluminação para o crescimento das plantas.

No entanto, existem algumas dificuldades para esta nova técnica. Primeiro, algumas pessoas não compreendem bem as características das fontes de luz artificial. Em segundo lugar, o mecanismo da fotobiologia sob diferentes espectros não é suficientemente claro para todas as espécies. Terceiro, a agricultura é um grande sistema de grande complexidade. Como resultado, a Radiação Fotossinteticamente Ativa (do inglês, *Photosynthetically Active Radiation*) (PAR) são selecionados incorretamente e geralmente têm baixa eficiência e alto consumo de energia, que se tornam os principais obstáculos para aplicações.

O diodo emissor de luz (LED) comparado com o legado fontes de luz tem vantagens inigualáveis, como alta eficiência, longa vida útil, flexibilidade de espectro, luz monocromática, tamanho pequeno e robusto, etc. Além disso, os sistemas de iluminação LED utilizam fonte de alimentação CC, que são mais confiáveis e fáceis de controlar. Assim sendo, os sistemas de iluminação LED tornam-se cada vez mais populares para os pesquisadores, engenheiros de design, fabricantes e biólogos. O LED é uma escolha ideal para se espalhar na horticultura em estufa.

1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVO

O presente trabalho surgiu do interesse em pesquisar a utilização dos LEDs na iluminação para o desenvolvimento de plantas. A motivação principal desta pesquisa é fornecer uma alternativa eficiente para experimentos envolvendo luz artificial na área de

fisiologia vegetal. Com esse propósito, foi dimensionada e prototipada uma luminária de LEDs e um *driver* de dois canais independentes com dimerização para o seu acionamento, e realizadas algumas simulações e medições experimentais no Núcleo de Iluminação Moderna da Universidade Federal de Juiz de Fora (NIMO-UFJF).

O objetivo central do trabalho é investigar a aplicabilidade da iluminação da tecnologia de estado sólido no crescimento e desenvolvimento da planta lúpulo (*Humulus lupulus L.*), realizando o protótipo de uma luminária LED com determinada quantidade de a Densidade de Fluxo de Fótons Fotossintéticos (do inglês *Photosynthetic Photon Flux Density*) (PPFD) entregue a culturas específicas, e considerando uma distância conhecida entre as folhas da planta e a luminária. Da mesma forma, utilizando-se uma PPFD parecida, será selecionada a potencia da lâmpada de vapor de sódio, para ser utilizada em uma estufa de comparação de luminárias LED e de vapor de sódio para um futuro estudo de crescimento e desenvolvimento da planta de lúpulo.

Para atingir os objetivos propostos, foi feita uma extensa revisão de trabalho de pesquisa realizado até agora, de modo que nenhuma fora ainda realizada com a planta de lúpulo. Assim, foi desenvolvida e prototipada uma luminária LED, apresentando o porquê da escolha da quantidade e potência de LEDs e o espectro dos dois tipos de LED escolhido, além da apresentação de resultados de PPFD, irradiância e fluxo radiante para a mesma. Também foi desenvolvido um *driver* para o acionamento desta luminária de LEDs.

Convém salientar que o lúpulo foi escolhido como planta principal do experimento por ser uma planta que se desenvolve melhor em latitudes entre 35°C a 55°C, em climas mais frios e que requer muita luminosidade para se desenvolver. Portanto, foi aceito o desafio de simular um clima em que a planta conseguiria se desenvolver aqui no Brasil.

Além disso, o lúpulo é o principal ingrediente para a fabricação de cerveja, produto este em grande desenvolvimento atualmente, principalmente em sua modalidade artesanal. Dessa maneira, uma vez confirmado um ambiente onde o lúpulo possa se desenvolver no Brasil, os custos de produção, processos de estocagem e transporte seriam menores, o que contribuiria para o desenvolvimento econômico local.

1.2 TRABALHOS FUTUROS

Um dos principais objetivos do trabalho é identificar as principais vantagens que o uso da iluminação em estado sólido poderia proporcionar à iluminação hortícola considerando o rápido desenvolvimento da tecnologia LED. Dessa maneira, será implementado daqui a

alguns meses um experimento em uma câmara fechada, sem luz natural, em que é comparado o crescimento do lúpulo com iluminação em LED e iluminação em lâmpada de vapor de sódio, com três plantas de lúpulo para cada tipo de iluminação. O resultado obtido nesse experimento apresentará respostas importantes da eficiência prática da luminária LED prototipada nesse trabalho.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

No capítulo 2 explicam-se conceitos fundamentais da iluminação, fotossíntese, os sistemas de medição de luz e seu equacionamento, as diversas lâmpadas utilizadas para fisiologia vegetal, o desenvolvimento do LED ao longo dos anos e seu funcionamento.

No capítulo 3, tem-se a revisão bibliográfica com o objetivo de ser referência para algumas características da luminária LED.

No capítulo 4, foi explicado o motivo da escolha pela planta de lúpulo, suas características principais e o modelo de estufa de comparação de luminárias proposto.

No capítulo 5, apresenta-se a análise da luminária LED, o seu espectro, razão e potência dos LEDs utilizados, o modelo PET sugerido para estimar o fluxo radiante e suas simulações.

No capítulo 6, foi apresentado o protótipo da luminária LED realizada, os resultados obtidos experimentalmente para cálculo de PPF, irradiação e fluxo radiante.

No capítulo 7, consta o protótipo do *driver* para acionamento da luminária LED e o resultado de sua simulação.

Por fim, o Capítulo 8 apresenta as conclusões gerais do presente trabalho e algumas propostas para a continuidade de pesquisas relacionadas ao uso dos LEDs em estudos de fisiologia vegetal envolvendo luz artificial.

2 ILUMINAÇÃO

2.1 RADIAÇÃO FOTOSSINTÉTICA ATIVA (PAR)

O sol é a principal fonte luminosa do planeta Terra, responsável pela emissão de radiação eletromagnética que se propaga transportando energia. Tal radiação possui uma distribuição espectral cuja banda de comprimento de onda tem de 300nm a 2500nm. (TAIZ, 2017). No entanto, apenas 50% da radiação que atinge a superfície terrestre é Radiação Fotossinteticamente Ativa (do inglês, *Photosynthetically Active Radiation*) (PAR) (FREITAS, 2005). A PAR é a região de comprimento de onda entre 400 nm a 700 nm do espectro eletromagnético, de acordo com Comissão Internacional de Iluminação (do francês, *Commission Internationale de L'Eclairage*) (CIE) (LECLAIRAGE, 1993), e é a faixa de espectro utilizada pelos vegetais para a realização da fotossíntese. A PAR está representada na figura 1, comparada com a região de maior sensibilidade do olho humano e das plantas em geral.

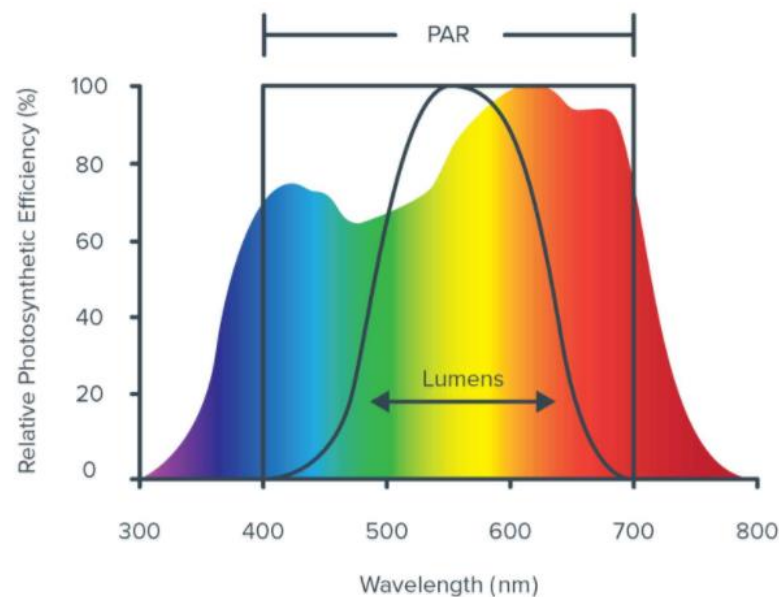


Figura 1: Curva da resposta da luz fotossintética (FLUENCE, 2017)

A representação utilizada para a PAR é baseada no sistema quântico e é por número de moles (mols), mais usada em micromoles (μmol) de fótons. Um mole é uma unidade de medida usada em química para expressar o número de entidades elementares em uma substância que é igual ao número de átomos em 12 gramas do isótopo carbono-12. Ela

corresponde à constante Avogadro, cujo valor N_A é de $6,022 \times 10^{23}$ partículas (neste caso fótons) por mole. (ASHDOWN, 2014)

A terminologia recomendada para relatar e quantificar as medidas instantâneas da PAR é a Densidade de Fluxo de Fótons Fotossintéticos (do inglês, *Photosynthetic Photon Flux Density*) (PPFD). A PPFD mede a quantidade de PAR que realmente chega à planta, ou o número de moles de fótons fotosfeticamente ativos em uma superfície por unidade de área por unidade de tempo ($\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$). Assim para saber a verdadeira intensidade de luz de uma lâmpada sobre uma área de crescimento designada, é importante que a média de várias medidas PPFD a uma altura definida seja tomada. Uma medida única não lhe diz muito, uma vez que as luzes de horticultura são geralmente mais brilhantes no centro, com níveis de luz diminuindo à medida que as medidas são tomadas em direção às bordas da área de cobertura. O certo é os fabricantes de iluminação disponibilizem a distância de medição da fonte de luz (vertical e horizontal), número de medidas incluído na média, e a relação min / max. (FLUENCE, 2017)

Existe também o fluxo fotônico fotossintético (do inglês, *Photosynthetic Photon Flux*) (PPF) que mede a quantidade total de PAR que é produzida por um sistema de iluminação a cada segundo ($\mu\text{mol} / \text{s}$). É importante notar que o PPF não lhe diz quanto da luz medida realmente pousa nas plantas, mas é uma métrica importante se você deseja calcular a eficiência do sistema de iluminação na criação de PAR. (FLUENCE, 2017)

O PPFD é um melhor preditor de fotossíntese quando são consideradas fontes de luz com diferentes distribuições de energia espectral e, portanto, é a métrica mais utilizada pelos horticultores.

A PAR também pode ser medida em termos de energia, em vez de fótons. A energia de um fóton com comprimento de onda λ é dada pela relação Planck-Einstein:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

Na equação 1, E é a energia em joules, h é a constante de Planck ($6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Joule} \cdot \text{segundos}$), c é a velocidade da luz ($2,998 \cdot 10^8 \text{ metro/segundos}$) e λ é o comprimento de onda medido em metros.

Existem duas medidas comuns para a PAR: fluxo fotônico fotossintético (PPF) e rendimento de fluxo de fótons (do inglês, *Yield Photon Flux*) (YPF). O PPF pesa todos os fótons de 400 a 700 nm igualmente e assume que os comprimentos de onda fora desse

intervalo possuem zero ação fotossintética, enquanto o YPF pesa os fótons na faixa de 360 a 760 nm com base na resposta fotossintética da planta que em termos de design de iluminação, é sinônimo de irradiação. (BARNESL, 1993)

O fluxo de fótons fotossintéticos é medido em Watts (joules por segundo), e é referido como o YPF, em termos de design de iluminação, é sinônimo de irradiação. (ASHDOWN, 2014)

Porem deve-se observar que o PPFD (densidade de fluxo quântico) e YPF (irradiação) não são medidas perfeitas da radiação fotossinteticamente ativa, PAR, pois estes superestimam a eficácia da luz azul em relação ao vermelho. O erro é maior para YPF, explicando o motivo pelo qual as medidas PPFD são preferidas pelos horticultores. No entanto, eles são úteis, pois independem de qualquer espécie de planta, e podem ser medidos tanto no laboratório como no campo por um radiômetro com um sensor quântico. (ASHDOWN, 2014)

Em seu experimento, o professor McCree (1972), precursor neste estudo, mediu a PAR das suas 22 espécies de culturas tanto no campo como em uma câmara fechada de crescimento laboratorial, obtendo os seguintes espectros de ação:

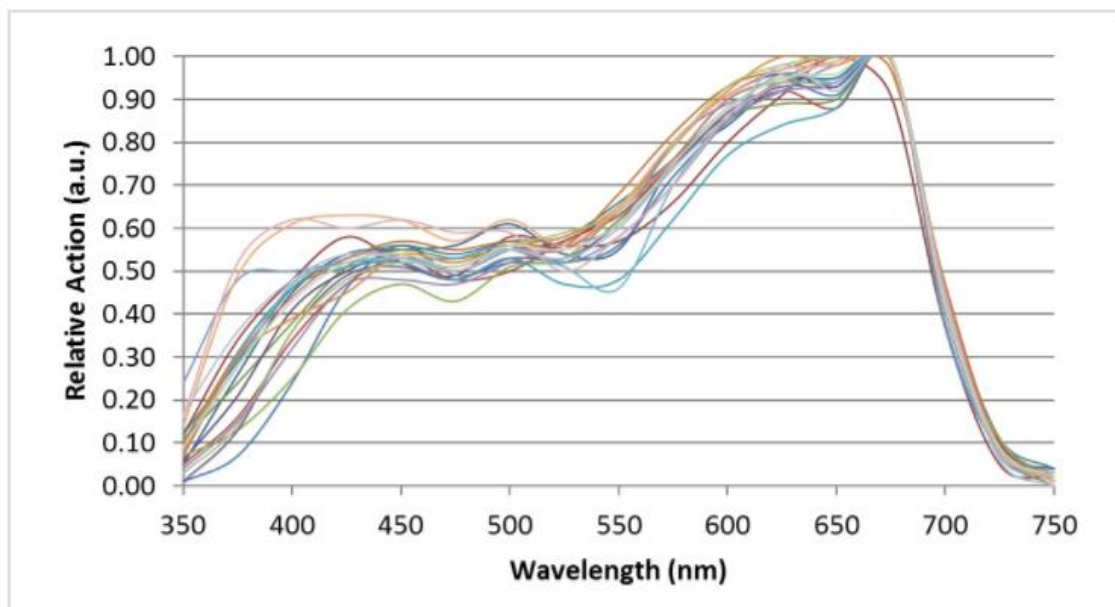


Figura 2: Espectro de ação da câmara de crescimento. (ASHDOWN, 2014)

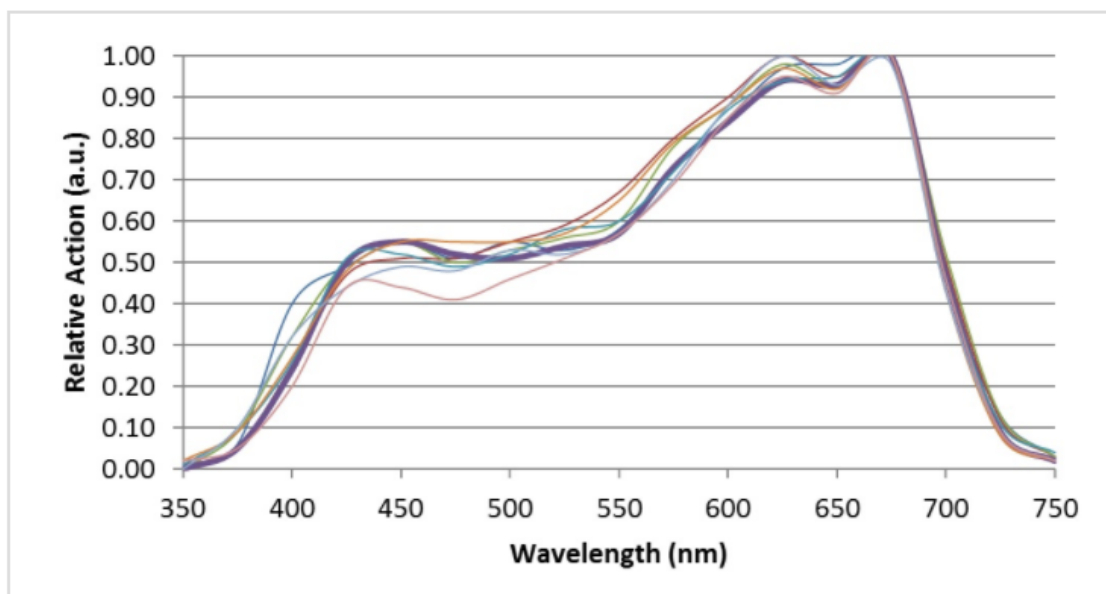


Figura 3: Espectro de ação de campo. (ASHDOWN, 2014)

Pelas imagens acima, percebe-se claramente o espectro de ação entre os comprimentos de onda de 400 a 700 nm. Quando os comprimentos de onda se encontram abaixo de 400 nm, existe o risco de foto-oxidação, gerando radicais tóxicos, que podem destruir a clorofila da célula e outros componentes celulares. Por outro lado, em comprimentos de onda acima de 700 nm, a energia do fóton de luz é insuficiente para ativar o processo fotossintético, através das clorofilas e carotenóides.

A maneira como ocorre essa interação entre os vegetais com a luz é ainda uma preocupação contínua dos produtores, pesquisadores, engenheiros e agrônomos. Essa interação é a base para fotossíntese e também a fotomorfogênese. A fotomorfogênese é o desenvolvimento da forma e estrutura nas plantas, afetada pela luz e fototropismo, que é a designação dada ao movimento dos seres vivos em reação a estímulos luminosos. Esses são os principais processos reguladores do desenvolvimento e crescimento das plantas junto à iluminação, e a fotossíntese é o processo mais importante. (ALMEIDA, 2014a).

2.2 FOTOSSÍNTESE

A fotossíntese (síntese pela luz) é um processo físico-químico utilizado pelas plantas e outros organismos autotróficos para converter a energia da luz, normalmente a partir do sol, em energia química, usada para suprir as atividades dos organismos.

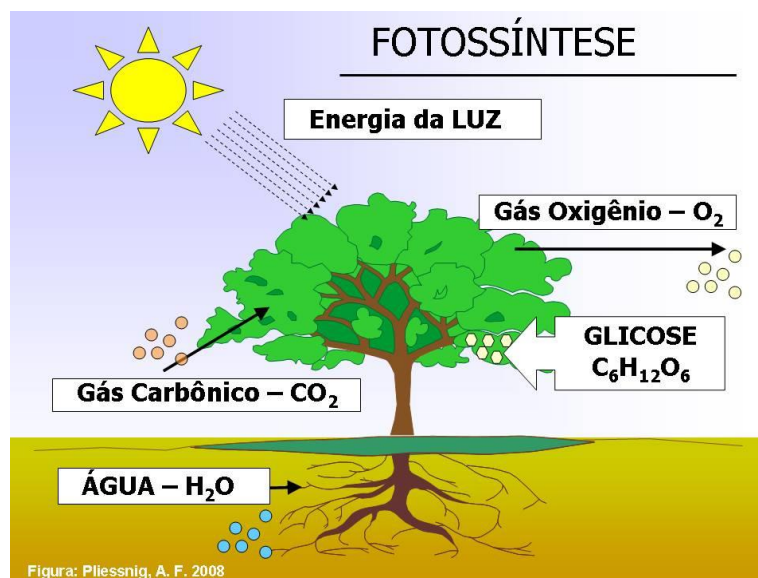
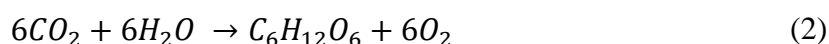


Figura 4: Fotossíntese. Fonte: <http://flores.culturamix.com>

Durante a fotossíntese as plantas absorvem parte da energia solar para converter o dióxido de carbono atmosférico em carboidratos, cujo subproduto é o oxigênio. Tal processo ocorre por meio da absorção da luz por pigmentos fotossintéticos podendo ser a clorofila (vermelho e azul), carotenóides (PAR) e bilinas. Assim, a fotossíntese mantém os níveis de oxigênio na atmosfera e fornece a maior parte da energia necessária para a vida na Terra. (FREITAS, 2005)

A equação 2 apresenta a equação química da fotossíntese simplificada.



Os carboidratos, como açúcar e glicose ($C_6H_{12}O_6$) e oxigênio (O_2) são os produtos do processo de fotossíntese, e estes são sintetizados do dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O). (PINHO et al., 2008).

Embora a fotossíntese seja realizada de forma distinta dependendo das espécies de vegetais, o processo se inicia quando a energia da luz é absorvida por proteínas que contêm pigmentos de clorofila verde. Em plantas, essas proteínas são mantidas em organelas denominadas cloroplastos, que são abundantes nas células da folha. Outro pigmento interno encontrado nas plantas e que também contribui para esse processo, é o denominado carotenóide. A fotossíntese relaciona à absorção em diferentes comprimentos de onda de luz (espectro de ação) de três pigmentos, clorofila a, b e β – caroteno, que serão explicados mais a frente. (ALMEIDA, 2014a)

2.3. FOTOSSISTEMAS

É interessante observar que a resposta da planta na região PAR é diferente da resposta em relação ao olho humano, conforme mostra a Figura 5.

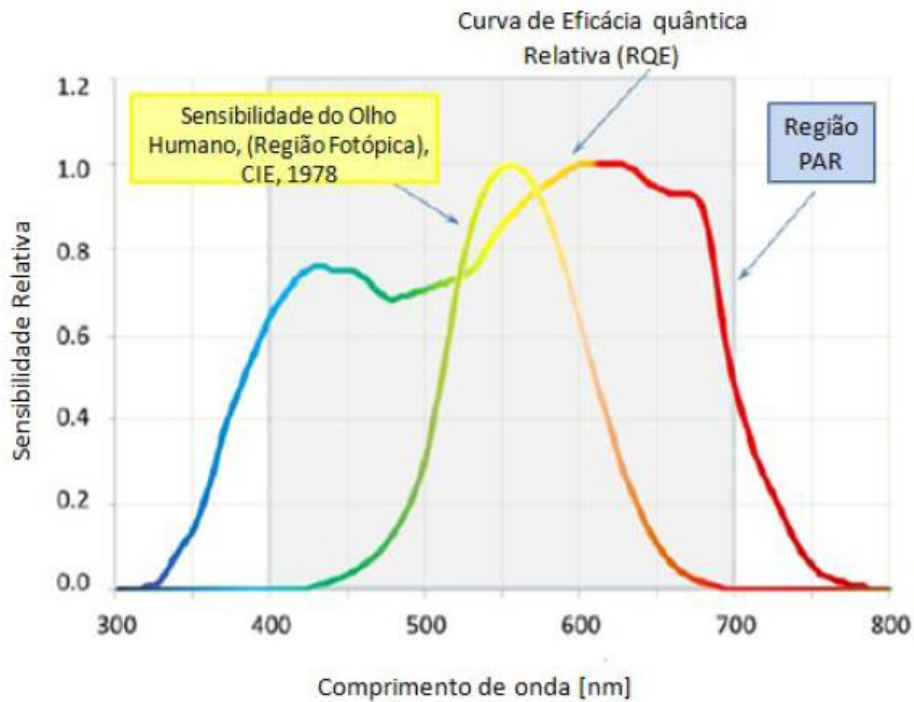


Figura 5: Comparação entre a sensibilidade da luz do olho humano (Visão Fotópica, CIE) e das plantas superiores (ALMEIDA, 2014a).

As plantas têm determinada sensibilidade dependendo do comprimento de onda, e esta resposta é denominada Eficácia Quântica Fotossintética Normalizada (do inglês, *Relative Quantum Efficiency*) (RQE), esta curva abrange de 320nm a 780nm de um estudo do (McCree1972a) e ajustada por Sager et al. 1982. A partir da Figura 5, percebe-se que as plantas têm maior sensibilidade, nas faixas de comprimento de onda do vermelho (610-630 nm) e do azul (430 nm), ocorrendo assim uma maior atividade fotossintética nestas bandas.

Cada folha tem uma determinada concentração de pigmentos vegetais, como a clorofila A e B, vários carotenóides (carotenos e xantofilas) e antocianinas. Como exemplo, tem-se que as clorofilas são responsáveis pela cor verde característica das folhas e alguns outros pigmentos contribuem para as cores amarelas, alaranjadas e vermelhas, que ocorrem na estação de outono, depois que as clorofilas se decompõem. (ASHDOWN, 2014).

Os espectros de absorção das plantas em geral são mostrados na Figura 6 e enfatiza a absorvância para a clorofila A, clorofila B, β -caroteno e duas isoformas de fitocromo, o Pr e o

Pfr. Estes perfis de absorção no espectro eletromagnético foram medidos in vitro dissolvendo os pigmentos como extratos em solvente. Assim, é possível observar que na faixa espectro de aproximadamente 680 nm, a absorção da luz é mais efetiva devido, principalmente, à clorofila a. Em 650 nm, a luz é mais absorvida pela clorofila b, e em comprimentos de onda mais curtos, a luz é absorvida pelas clorofilas a, b e β - caroteno. Pode se perceber também, que os dois mais importantes picos de absorção de clorofila estão localizados na região vermelha e azul de 625 a 675 nm e de 425 a 475 nm, respectivamente. Ademais, existem outros picos localizados em quase UV (300 a 400 nm) e na região de vermelho distante (700 - 800 nm), sugerindo-se assim, a utilização de LEDs nesses comprimentos de onda para aplicações agrícolas.

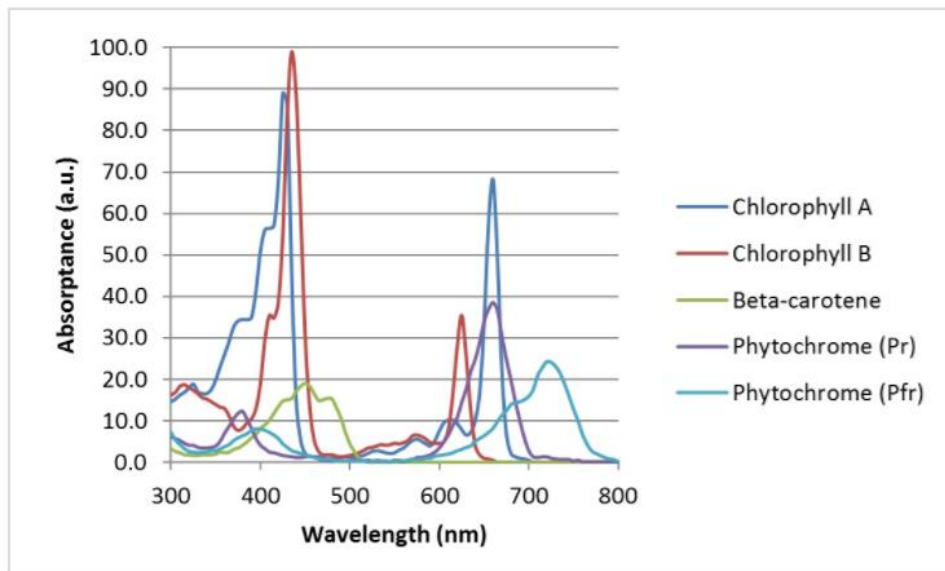


Figura 6: Absorbância espectrais de fotopigmentos da fotossíntese em plantas verdes (ASHDOWN, 2014).

Os fitocromos Pr e Pfr, correspondem à radiação 660 nm vermelho e 735 nm de radiação infravermelha respectivamente. Eles podem influenciar e causar diferentes respostas fisiológicas, como a expansão da folha, percepção da planta ao lado, evitação da sombra, alongamento do caule, germinação das sementes e indução de flores. Os fitocromos ainda estão em constante estudo e já se descobriu mais de 5 tipos deles, como phyA, phyB, phyC, phyD e phyE. O fitocromo Pr possui um pico de absorbância espectral de 660 nm. Quando este absorve um fóton vermelho, ele se converte em seu estado de fitocromo Pfr, que tem um pico de absorbância espectral de 730 nm. Quando este fitocromo absorve um fóton na cor vermelho distante (do inglês *far red*) (FR), converte-se de volta ao seu estado Pr e, assim, desencadeia uma mudança fisiológica na planta. (ASHDOWN, 2014)

Importante notar que, a radiação em comprimentos de onda abaixo de 300 nm podem ser altamente prejudiciais às ligações químicas das moléculas e para a estrutura do DNA, apesar das plantas absorvem radiação nessa região. Um experimento na absorbância espectral da radiação UV (280-320nm) mostrou que luzes nessa região causam redução na taxa de crescimento das plantas. (ROUT, 2013) Portanto, a qualidade da radiação dentro da região PAR é importante para reduzir os efeitos destrutivos da radiação UV.

Por fim, esses fotorreceptores são os principais e mais pesquisados até o momento, e portanto, suas funções na fotossíntese e no crescimento das plantas são bem reconhecidas. Outros fotopigmentos regulam o fototropismo (orientação da folha e do caule), os ritmos circadianos (para os quais a luz azul é a mais efetiva), a fotomorfogênese (desenvolvimento da forma da planta que é afetada pela luz), o crescimento radicular, a abertura estomática, e o movimento do cloroplasto. (ASHDOWN, 2014)

2.4. SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE LUZ

A iluminação de estado sólido é vista com crescente interesse e expectativas na iluminação utilizada na horticultura, porém, tem sido dificultada por diversos motivos. Talvez, o mais expressivo deles é o preço alto dos LED, quando comparado ao valor das fontes de luz convencionais. Outros aspectos relevantes estão relacionados às suas características elétricas, ópticas e térmicas, não convencionais, que requerem a definição e padronização de vários aspectos, como os procedimentos de medição.

Para iluminação para horticulturas, a situação é ainda mais complicada devido à falta de um sistema de medição amplamente aceito para radiação utilizado pelas plantas durante a fotossíntese. Métricas diferentes são usadas com frequência e indiscriminadamente para quantificar radiação para o crescimento de plantas. As unidades radiométricas, quânticas, fitométricas e fotométricas são usadas para quantificar e relatar a radiação fotossintetizada. (PINHO et al., 2008).

Existem três sistemas de medição de radiação: o sistema radiométrico, o fotométrico e o quântico. O sistema quântico é o mais adequado para efeitos de luz sobre as plantas. A medição quântica é a situação que existe a maior variedade de sensores, pois apesar de sua base ser em mols, há pelo menos três formas de detecção: PPF, YPF E PPFD, como já visto anteriormente. Para todos os casos a resposta de frequência está na faixa denominada PAR indo de 400nm a 700nm. Isto permite antever que as medições quânticas revelam uma nomenclatura uma vez que empregam a mesma unidade em várias bases de medição, segundo

o tipo de sensor. (COSTA, 2006). Porém, trabalhos referentes a projetos de luz para desenvolvimento de plantas, em geral, utilizam todos os três sistemas dependendo do conhecimento do pesquisador.

No sistema radiométrico a curva que representa a resposta de sensibilidade dos vegetais é uma reta, e possui uma faixa de relevância dentro de 300 a 800 nm do comprimento de onda. Conforme representado na figura anterior, o sistema fotométrico possui uma curva RQE em e está limitado entre os comprimentos de onda de 320nm a 780 nm. O sistema quântico tem comprimento de onda limitado entre 400 a 700 nm, e podem ocorrer três possibilidades de resposta, conforme mostra a figura 7: Uma resposta totalmente plana, outra quântica, que se refere a energia de fótons, e a terceira, irregular, conforme a absorbância dos fótons determinado pela curva RQE, conforme visto anteriormente. (ALMEIDA, 2014a)

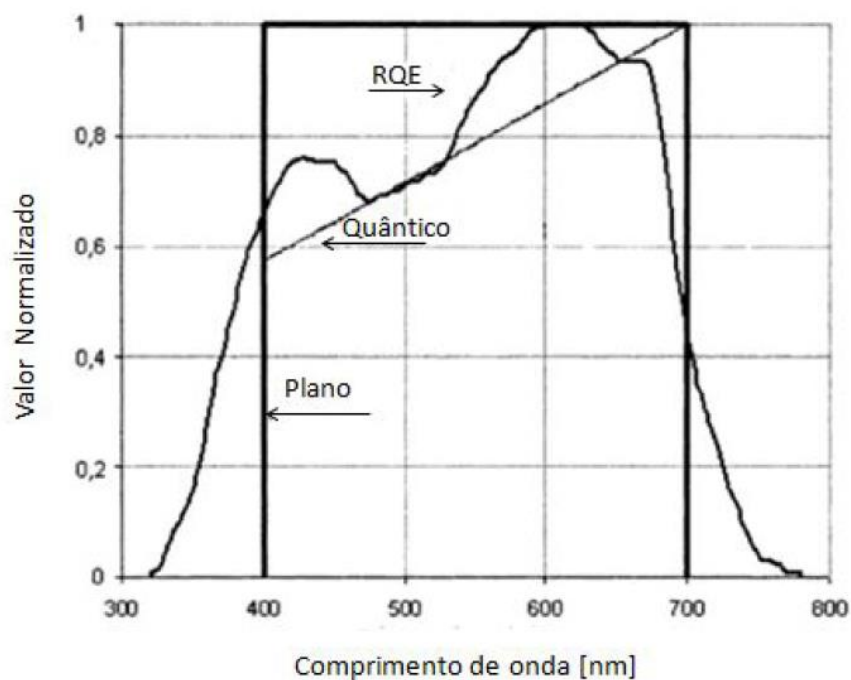


Figura 7: Curvas de resposta quântica e a curva RQE (COSTA, 2006).

2.4.1 SISTEMA RADIOMÉTRICO

Todos os outros sistemas de medição energética baseiam-se no sistema radiométrico. A radiometria é a ciência que se dedica se ao estudo das transferências de energia radiativa e sua medição de radiação óptica varia da luz ultravioleta até o infravermelho. As formas de energia podem ser emitidas, absorvidas, refletidas e transportadas por inúmeras superfícies do ambiente. A quantização da luz é de extrema importância pois permite que as interações da luz com a superfície sejam devidamente representadas. (ALMEIDA, 2014a) (MOGO, 2014)

2.4.2 SISTEMA FOTOMÉTRICO

A fotometria dedica-se a medição da luz visível, tal como ela é percebida pelo olho humano. Nesse sistema, pode-se escrever a equação para iluminância, que representa o fluxo luminoso por unidade de área que cai sobre uma superfície, a unidade é lúmen por metro quadrado ou lux. (ALMEIDA, 2014).

2.4.3 SISTEMA QUÂNTICO

No sistema quântico, as unidades são baseadas em mols, a unidade de densidade de fluxo de fótons é $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Para converter a unidade Watt para mol, pode se utilizar a equação 3: (ALMEIDA, 2014a).

$$R_q(\lambda) = \frac{\lambda}{N \cdot h \cdot c} = \frac{\lambda}{0,1196} \quad (3)$$

Onde h é a constante de Planck, c é a velocidade da luz, já mencionado seus valores acima, N é o numero de Avogadro ($6,023 \cdot 10^{23}$ fotons) e λ o comprimento de onda em nanometro. Juntando as equações 4 a 7 pode-se obter a PPFD: (ALMEIDA, 2014a)

$$E_q = \int_{400}^{700} R_q(\lambda) \cdot E_{e\lambda} \cdot d\lambda \quad (4)$$

$$E_q = \int_{400}^{700} \frac{\lambda}{119,6} \cdot E_{e\lambda} \cdot d\lambda \quad (5)$$

$$E_q = \int_{400}^{700} E_{q\lambda} \cdot d\lambda \quad (6)$$

$$E_q = \int_{400}^{700} E_{q\lambda} \cdot P(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

Na equação acima, $P(\lambda)$ é a curva RQE. Se essa equação for limitada pela curva de RQE, a Densidade de Fluxo de Fótons Incidentes (E_q) transforma-se em Fluxo de Fótons Incidentes de Ação Fotossintética (YPFD) (ALMEIDA, 2014a).

Estes diversos sistemas podem gerar confusão, portanto, na tentativa de padronização das medidas, foi criado o sistema fitométrico.

2.4.4 SISTEMA FITOMÉTRICO

Fitométrico é o nome do novo sistema. Tal denominação tem origem nas palavras gregas 'Fyllo', 'fotos' e 'metrikos' que indicam 'folha', 'luz' e 'métrica', respectivamente. Este é tão completo quanto o fotométrico e, sendo específico para a produção de plantas, é de uso tão vasto que o limite de sua aplicação se restringe a condição humana de investigação. (COSTA, 2016) O sistema fitométrico lembra o sistema quântico ou fotônico, pois se baseia em taxas fotossintéticas do número de fótons que caem na área foliar por tempo unitário. A fotossíntese é dirigida pelo número de fótons e suas diferentes energias induzem diferentes respostas metabólicas e taxas de fotossíntese.

O fluxo radiante fitométrico (ϕ_p), é derivado de sua unidade equivalente quântica, o fluxo de fótons (ϕ_p), medido em fótons por segundo ($mol.s^{-1}$) ou a partir da quantidade radiométrica física fundamental, a potencia radiante (ϕ_e), medida em watts (W). Nos dois casos, o fluxo fitométrico (ϕ_p) deriva da avaliação da radiação emitida por uma fonte, de acordo com sua ação sobre a curva espectral relativa de eficiência quântica fotossintética, RQE. O fluxo fitométrico (ϕ_p) tem como unidade o fito watt (fitoW) e pode ser derivado utilizando-se a equação 8: (PINHO, 2008)

$$\phi_p = \int_{320}^{780} \phi_{e,\lambda} \cdot P(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

O sistema fitométrico tem o objetivo de gerar uma padronização e simplificação no sistema de unidades, para projetos que tratam da fotossintetização das plantas em geral. Sua unidade sendo em Watts possibilita a produção de catálogos específicos para lâmpadas, o que facilita e padroniza os projetos de sistema de iluminação voltados à produção de vegetais.

Apesar de o sistema quântico apresentar diferentes bases para uma mesma medida, o mesmo garante aos produtores, agrônomos, pesquisadores e engenheiros um sistema de medição de iluminação eficiente. Dessa forma, com base nos sistemas de medição de luz, apresentados neste capítulo, o presente trabalho fundamenta-se no sistema de medição quântica, devido à falta de um sistema de medição de radiação amplamente aceito, obtendo a

unidade de medida PPF das luminárias LED e vapor de sódio por meio do utilitário SpectraSuite (PAR) da Ocean Optics.

2.5 FONTES DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAIS UTILIZADAS NA HORTICULTURA

O sol tem uma enorme importância e necessidade à vida humana, por ser a fonte responsável pela iluminação e calor, os humanos sempre buscaram reproduzi-lo. Nesse sentido, a primeira tentativa de sua reprodução foi o fogo. Tempos depois, após o desenvolvimento de novas tecnologias, foi criada a iluminação elétrica. A primeira lâmpada foi desenvolvida por Thomas Edison, em 1879, atualmente denominada de lâmpada incandescente. Desde então, o uso da luz artificial foi aprimorado e com o constante desenvolvimento tecnológico apareceram novas tecnologias em iluminação como alternativa de aplicação, sendo, em sua maioria, voltadas para a visão humana.

2.5.1 LÂMPADA INCANDESCENTE

A lâmpada incandescente, figura 8, produz luz quando a corrente elétrica passa através de um filamento. Ela é caracterizada por uma grande quantidade de emissão de vermelho distante (FR), sendo aproximadamente 60% do total de luz emitida PAR. A sua eficiência é muito baixa, variando entre 9% a 12% e, portanto, além de gastar muita energia, elas geram muito calor. Ademais, possuem uma baixa vida útil de aproximadamente 2000 horas. (PINHO et al., 2008). O espectro eletromagnético envolve região fora da PFFD das plantas em sua porção maior e sua elevada temperatura não permite o posicionamento muito perto das plantas com risco de queimá-las, impedindo assim a possibilidade de se tentar atingir altos valores de PFFD com a mesma. No Brasil, em 2016, proibiu-se a venda de todos os tipos de lâmpadas incandescentes, com o objetivo de minimizar o desperdício no consumo de energia elétrica. (VENTURA, 2015).



Figura 8: Lâmpada incandescente. Fonte: <http://g7power.com/>

2.5.2 LÂMPADA FLUORESCENTE

A lâmpada fluorescente, exibida na Figura 9, possui boa eficiência, pois emite mais energia eletromagnética em forma de luz do que calor, ao contrário da lâmpada incandescente. Esse tipo de lâmpada possui um par de eletrodos em cada extremo, e um tubo de vidro coberto por um material à base de fósforo. Assim, quando o tubo é excitado com radiação ultravioleta, gerada pela ionização dos gases, produz-se luz visível.



Figura 9: Lâmpadas fluorescentes. Fonte: <http://www.geocities.ws/>

As lâmpadas fluorescentes são mais utilizadas no crescimento de plantas do que as lâmpadas incandescentes, pois mais de 90% dos fótons emitidos estão dentro da região PAR. As lâmpadas fluorescentes, do tipo tubular, podem alcançar os valores de eficiência de 20% a 30%, e vida útil de 12.000 horas. Existem ainda, as lâmpadas fluorescentes especiais que

podem atingir vida útil de 20.000 a 36.000 horas. Este tipo de lâmpada, utilizada para crescimento de vegetais, tem ainda mais vantagem por causa da grande quantidade de radiação azul emitida, que, conforme já explicitado, é indispensável para alcançar uma morfologia equilibrada para a maioria das plantas cultivadas. Assim, as lâmpadas fluorescentes são frequentemente usadas para a substituição total da radiação da luz natural em estufas fechadas e câmaras de crescimento. (PINHO et al., 2008).



Figura 10: Lâmpada fluorescente no crescimento de plantas em estufa fechada.

Fonte: <http://www.literarynobody.com>

2.5.3 LÂMPADA DE VAPOR DE SÓDIO

A lâmpada de sódio de alta pressão (do inglês, *High Pressure Lamps*) (HPS) é uma lâmpada de descarga em meio gasoso, que utiliza um plasma de vapor de sódio para produzir luz, cuja iluminação tem a cor amarelo forte. A grande vantagem dessas lâmpadas é que possuem um índice de reprodução de cor baixo, e uma eficácia luminosa alta.



Figura 11: Lâmpada HPS (ALMEIDA, 2014a).

As lâmpadas de vapor de sódio ultimamente são a fonte de luz preferida para produção de culturas em estufas. As principais razões são a alta emissão radiante, o baixo preço, o longo tempo de vida, a alta emissão de PAR e a alta eficácia elétrica. Este tipo de lâmpada é bastante utilizada como fonte suplementar de radiação luminosa, apoiando o crescimento vegetativo de forma econômica durante o inverno nos países do hemisfério norte. Assim, ela tem a capacidade de melhorar o processo de frutificação e de floração nas plantas.

No entanto, possui alto potencial de provocar estiolamento de plantas, que é processo de estilo do crescimento longitudinal da planta na tentativa dessa conquistar um espaço rico em luminosidade na natureza, a emissão espectral é desequilibrada em relação aos picos de absorção de alguns importantes pigmentos fotossintéticos, como clorofila a, a clorofila b e o betacaroteno, por causa da coloração de sua iluminação ser bastante amarela. Em comparação com outras lâmpadas, ela tem baixa emissão de luz azul, induzindo um alongamento excessivo do caule para a maioria das culturas cultivadas sob iluminação HPS. Portanto, muitas estufas, quando utilizam este tipo de lâmpada, adicionam uma fonte de luz na cor azul para suplementação. (WHEELER, 1991).

A sua eficiência elétrica é entre 30% e 40%, sendo, atualmente, uma das mais eficientes para o crescimento da planta. Aproximadamente 40% da energia de entrada é convertida em fótons dentro da região PAR e quase 25% a 30% em vermelho distante (FR) e infravermelho (IV). A vida útil esta entre 10000 a 24000 horas. (PINHO et al., 2008).



Figura 12: Lâmpadas HPS no crescimento de vegetais (RUNKLE, 2008).

A figura 13 apresenta a distribuição espectral de energia relativa a uma lâmpada de descarga de alta intensidade usando vapor de sódio em alta pressão (HPS) de 400 W, muito utilizada em casas de vegetação. A linha tracejada corresponde a potencia normalizada da lâmpada, e a curva continua suave a representação do RQE (para fins de comparação).

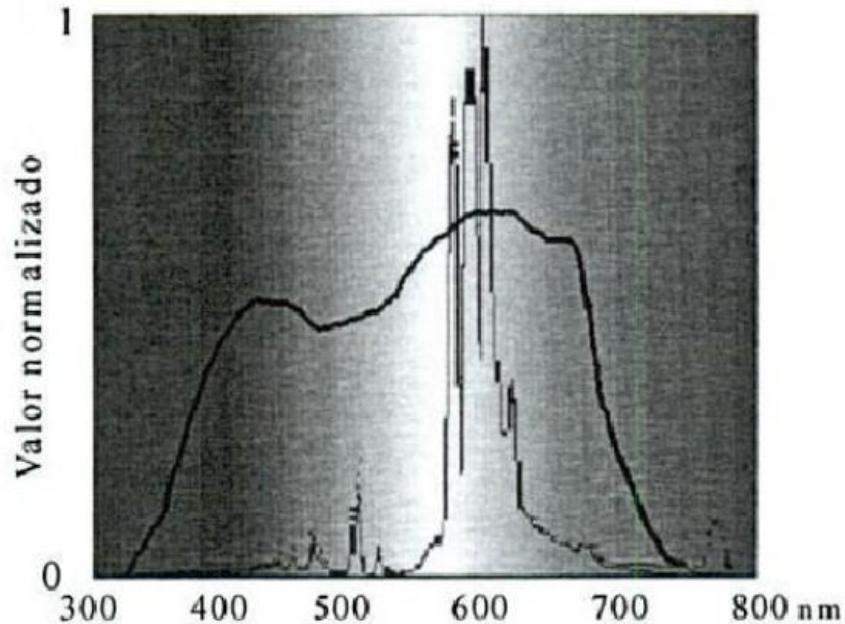


Figura 13: Espectro de energia da lâmpada de vapor de sódio de 400 W comparado com a curva RQE (COSTA, 2006)

Existem ainda, outros tipos de fontes de luz artificial que podem fornecer soluções interessantes para aplicações de crescimento de plantas, a maioria por causa da sua eficácia. No entanto, elas costumam ter alto custo se comparada a essas ou não preencher suficientemente a região PAR.

A iluminação é um dos aspectos importantes que devem ser otimizados, pois em uma safra que dura o ano todo em estufas, a contribuição do custo da eletricidade pode atingir até 30%. Atualmente, com o aumento dos preços da eletricidade e a necessidade de reduzir as emissões de CO₂, tem-se uma preocupação constante em fazer um eficiente uso da energia. Após décadas de pesquisas em universidades e da Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço (do inglês, *National Aeronautics and Space Administration*) (NASA), o diodo emissor de luz (do inglês *light-emitting diode*) (LED) e a iluminação de estado sólido (do inglês *solid-state lighting*) (SSL) é ferramenta viável e promissora que podem ser utilizadas na iluminação de horticultura, por haver um controle do espectro, longa vida útil das luminárias, controle de intensidade luminosa e baixa geração de calor pela luminária podendo ser colocada próxima as plantas. (PINHO et al., 2008).



Figura 14: Lâmpadas de LEDs no crescimento de vegetais (SMITT, 2016).

2.6 DIODO EMISSOR DE LUZ (LED)

2.6.1 TECNOLOGIA

Os LEDs começaram a ser mais utilizados em 1960. Os primeiros LEDs tinham a cor vermelha e eram utilizados em dispositivos comerciais, como indicadores de luz on-off, possuindo baixa intensidade luminosa e baixa potência. Desde então, eles se desenvolveram muito rápido.

Em 1990, foi criado o LEDs de alta intensidade ou de alto brilho (do inglês *high brightness LED*) (LEDs HB) que começaram a ser empregados em semáforos, luzes indicadoras externas de veículos e iluminação de emergência. Durante a década de 90, foi desenvolvido os LEDs de luz branca, utilizados na produção de LEDs azuis e verdes.

Conforme visto anteriormente, o comprimento de onda na faixa da cor azul é muito importante para a iluminação de vegetais, e a partir deste momento foi possível criar luminária utilizando apenas LEDs, e obter um resultado positivo. Os LEDs se tornaram uma fonte de luz promissora, usada na pesquisa de fisiologia em plantas e em aplicações experimentais de crescimento de plantas. Ao final da década de 90, surgem os primeiros LEDs de potência brancos, baseados em *chips* de InGaN, passíveis de serem aplicados em sistemas de iluminação de estado sólido. (ALMEIDA, 2014b)

Os LEDs são dispositivos semicondutores de estado sólido que possuem o fenômeno chamado de eletroluminescência, que converte energia elétrica em luz. Estes dispositivos

permitem passagem de corrente elétrica em apenas um sentido, e essa condução direta resulta na produção de fótons (luz) e de calor. Os LEDs não podem ser ligados diretamente na rede elétrica, pois precisam de sinais de tensão e corrente diferentes dos sinais fornecidos pela rede, e portanto, quando utilizados, é necessária a utilização conjunta de um conversor.

Atualmente, a maior desvantagem do LED é o seu alto custo, no entanto, devido ao rápido desenvolvimento de novas tecnologias, a quantidade de luz emitida por dispositivo está aumentando e os custos estão diminuindo. De acordo com a lei de Haitz, a evolução do desempenho do LED vermelho em termos de produção de radiação tem aumentado em um fator de 20 por década, enquanto o custo está diminuindo em um fator de 10 por década. (PINHO et al., 2008). A figura 15 traça a evolução da eficácia dos LEDs e estimativas futuras.

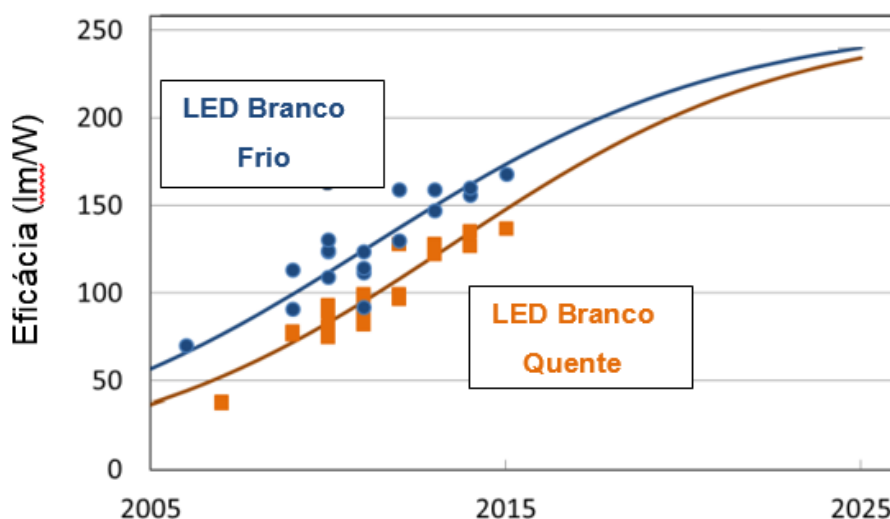


Figura 15: Eficácia luminosa

(histórica e projetada) em modelos comerciais de LEDs brancos (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2016).

A vida útil dos LEDs é certamente um dos seus principais atrativos. A maior parte dos fabricantes especifica algo em torno de 50 mil horas em suas folhas de dados, com 30% de redução do fluxo radiante nos LEDs quando acionados em sua potência nominal. Algumas estimativas conservadoras são de que a vida útil mínima seja de 40 mil horas. Porém, a vida útil é diretamente relacionada à temperatura de operação e a corrente aplicada no LED a qual os dispositivos estão submetidos. Assim, maiores temperaturas implicam em maiores taxas de degradação do *chip* e do encapsulamento e, conseqüentemente, do fluxo luminoso. (ALMEIDA, 2014b)

Além disso, os LEDs de potência costumam apresentar valores alta eficiência na conversão de energia elétrica em energia radiante em torno de 15% podendo atingir até 53,3% em dispositivos mais modernos (ALMEIDA, 2014b) Novos estudos esperam que o uso de

SSL contribua para a redução do consumo global de energia em 11% até 2020 e diminuirá a emissão de CO₂ entre 261 a 348 milhões de toneladas ao longo do mesmo período de tempo, e portanto, são considerados produtos “verdes”. (PINHO et al., 2008).

2.6.2 FUNCIONAMENTO DO LED

Um LED é uma junção positiva (tipo p) e negativa (tipo n) de materiais sólidos semicondutores. Na camada P, predomina as lacunas, que são a ausência de elétrons em determinadas ligações covalentes do átomo, e na região N, existe excesso de elétrons, ou também, pode-se dizer, carência de lacunas. Quando a junção P-N é polarizada diretamente, os elétrons e as lacunas das regiões opostas se movimentam em direção à junção P-N, também chamada de região de depleção. Este processo, com a recombinação entre esses portadores, resulta na emissão de fótons de luz. Este é o fenômeno conhecido como eletroluminescência. A Figura 16 ilustra a polarização direta de um diodo emissor de luz. (ALMEIDA, 2014a)

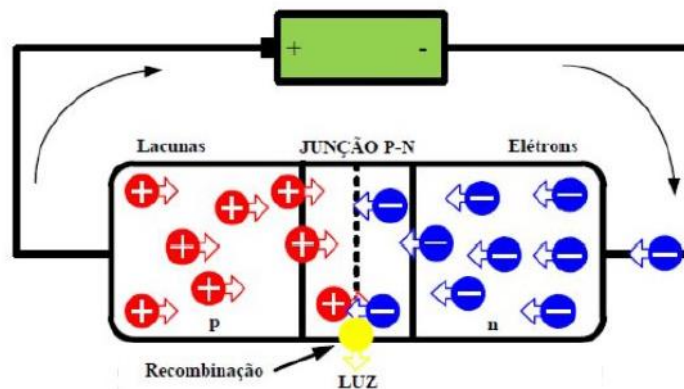


Figura 16: Polarização direta (BENDER, 2012).

A energia perdida neste processo de movimentação de elétrons e lacunas é convertida em fótons, conforme estabelece a equação 9:

$$E = \frac{h}{\lambda} \quad (9)$$

O comprimento de onda λ refere-se à diferença entre os níveis de energia e os compostos químicos empregados. E, é a energia de banda proibida (bandgap), e h é a constante de Planck ($6,62 \cdot 10^{-34} \text{J.s}$). Pode-se perceber, portanto, que a energia é inversamente

proporcional ao comprimento de onda, e assim, comprimento de onda baixo tem alta energia de fóton, e altos comprimentos de onda tem baixa energia de fótons.

A Figura 17 mostra como relacionam-se os comprimentos de onda com as cores e energias dos fótons emitidos, dentro e nos limites do espectro visível. (P. ALMEIDA, 2014)

Cor da luz emitida	Comprimento de onda (nm)	Energia de Fóton (e V)
Ultravioleta	< 390	> 3,18
Violeta	390-455	2,75-3,18
Azul	455-490	2,53-2,72
Ciano	490-519	2,41-2,53
Verde	519-570	2,18-2,41
Amarelo	570-600	2,60-2,18
Laranja	600-625	1,98-2,06
Vermelho	625-720	1,72-1,98
Infravermelho	>720	<1,72

Figura 17: Cor da luz emitida, Comprimento de onda, Energia de Fóton. (YAM; HASSAN, 2005)

2.6.3 CATEGORIA DOS LEDs

Os primeiros LEDs a surgirem foram os LEDs indicativos, na cor vermelha, e foram utilizados para indicar se determinada função de um equipamento elétrico ou eletrônico estava ativa ou não.

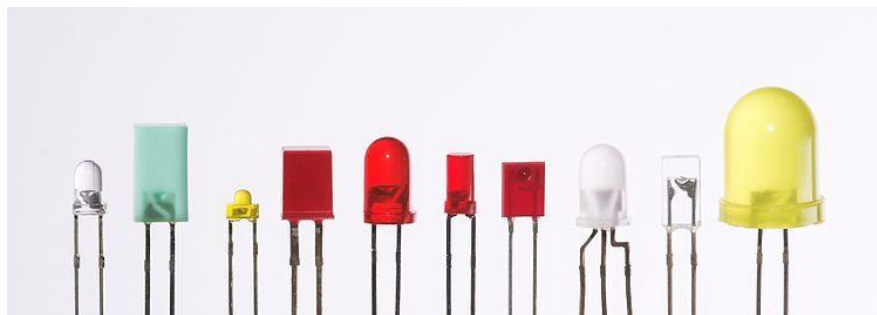


Figura 18: LEDs indicativos (CARTER 2012)

Existem também os LEDs de alto brilho (em inglês high brightness LEDs) (HB-LEDs) com um maior fluxo luminoso e eficiência se comparados com os LEDs indicativos, estes, normalmente utilizados em sinalização semafórica, dentre outras aplicações. Os melhores LEDs AlInGaP vermelho e AlInGaN verdes e azuis podem ter eficiências quânticas internas

de quase 100% e 50%, respectivamente. Para alcançar eficiência elétrica próxima dessas magnitudes, as eficiências quânticas externas estão melhorando para permitir que mais fótons escapem do chip de LED sem que sejam absorvidos pela estrutura que os envolvem. (PINHO et al., 2008)



Figura 19: LEDs de alto brilho (ALMEIDA, 2014a).

Outra categoria é a dos dispositivos de potência, mostrados na Figura 19, que trabalham com correntes mais altas do que as anteriores e suportam potências iguais ou superiores a 1W, além de apresentarem grande fluxo radiante e eficácia luminosa.

A construção física desses componentes tem o objetivo de permitir uma fácil remoção de calor do *chip* e possibilitar o máximo de extração de luz do semicondutor. Na maioria das vezes, é utilizado um encapsulamento de plástico para abrigar o *chip* do LED e este fica sobre um dissipador metálico de cobre ou alumínio, seus fios conectores são finos e metálicos (*bond wires*) de alumínio, cobre ou ouro. A estrutura dissipadora é utilizada para transferir o calor gerado no *chip* para uma superfície de dissipação maior e assim, para o ambiente externo, evitando o superaquecimento do componente, a sua possível autodestruição, a diminuição do fluxo luminoso ou a significativa redução da vida útil. (ALMEIDA, 2014b)

Por outro lado, diversas tecnologias concorrentes foram desenvolvidas para possibilitar a máxima extração de luz do *chip* semicondutor. O *chip* geralmente é constituído de um material altamente refrativo (com índice de refração muito superior ao do ar) e sua geometria e camadas de material incorporadas, devem ser planejadas de modo a melhorar a eficiência de extração luminosa do LED. Há vários tipos diferentes de encapsulamentos plásticos ou cerâmicos, e alguns desses encapsulamentos, de diferentes fabricantes, estão exibidos na Figura 20: (ALMEIDA, 2014b).

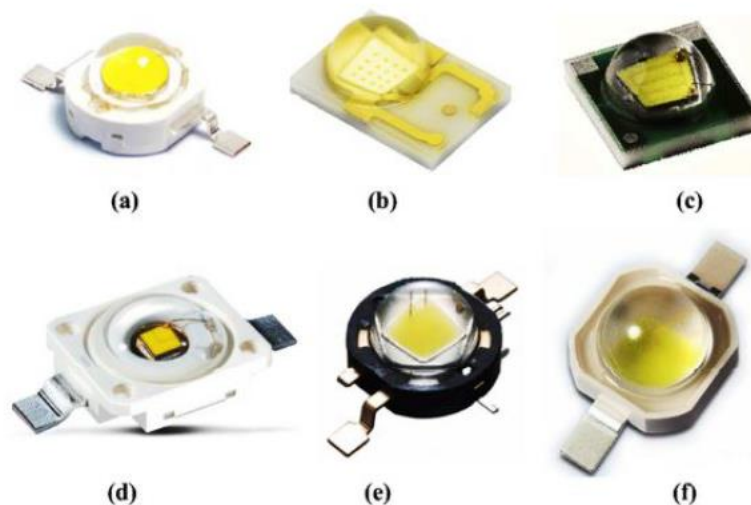


Figura 20: LEDs de potência com diferentes encapsulamentos.

(a) Bridgelux (b) Philips Lumileds (c) Cree (d) Osram (e) Seoul (g) Samsung (ALMEIDA, 2012a).

2.6.4 APLICAÇÃO DO LED PARA ILUMINAÇÃO EM ESTUFAS

O LED tem grandes vantagens na iluminação hortícola em relação às fontes de luz convencionais. Dentre elas, estão a economia de energia, o tempo de vida útil longo, o tamanho compacto, modelos com radiação em intervalos específicos do espectro permitindo flexibilização de espectro e, conseqüentemente, maior rendimento quanto a PAR, em que ocorre a absorção da fotossíntese das plantas, a direcionalidade do fluxo radiométrico, a capacidade de produzir elevados níveis de iluminação com baixo calor radiante, o total controle da radiação emitida e a ausência de substâncias tóxicas, como o mercúrio. A porcentagem de emissão não-fotossintética dos LEDs é muito baixa, ao contrário da lâmpada de vapor de sódio, e fluorescentes branca, com 41% e 8,6%, respectivamente. (PINHO et al., 2008)

Ademais, os LEDs não requerem refletores, pois são naturalmente emissores direcionáveis e assim, evitam a maioria das perdas associadas à ótica. Uma de suas características muito importante é a estreita largura de banda espectral de LEDs coloridos. Esta é a principal vantagem de se utilizar LEDs como fontes de radiação fotossintética, pois é possível selecionar a emissão de comprimento de onda do pico que mais se pareça com o pico de absorção de um fotorreceptor selecionado, proporcionando vantagens, como o uso eficiente da energia radiante pelo fotorreceptor em mediação de uma resposta fisiológica da planta, e a capacidade de controle de resposta ao controlar completamente a intensidade da radiação.

3. ANÁLISE DE RESPOSTA FISIOLÓGICA DE PLANTAS EM DIFERENTES CENÁRIOS DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL

Este capítulo se embasa em uma revisão bibliográfica para estabelecer a caracterização necessária para o projeto da luminária cujo envolve número e tipo de LEDs quanto ao espectro de emissão, arranjo e disposição na placa, estimativa de radiação PAR necessária para atender ao lúpulo e capacidade de dissipação do sistema.

Os primeiros estudos sugerindo a utilização de LEDs como fonte de radiação fotossintética para o crescimento de plantas foi confirmado no início da década de 1990. Nos experimentos iniciais, a alface (*Lactuca sativa L. 'Grand Rapids'*) foi cultivado sob LEDs vermelho e foi comparado a mesma planta cultivada sob lâmpadas fluorescentes. Porém nesta época, ainda não existia o LED azul e os estudos revelaram que a luz azul era indispensável para alcançar uma morfologia equilibrada de plantas de alface, então começou a usar LEDs vermelhos junto com lâmpada fluorescente azul o que melhorou um pouco o crescimento. Assim foi utilizado um *array* de LEDs vermelhos, foi utilizado 540 LEDs, divididos em 45 linhas por 12 colunas em uma placa transparente de policarbonato, suplementado com uma lâmpada fluorescente na faixa espectral de 400 a 500 nm (azul) com um fluxo fotônico fotossintético (PPF) de 30 $\mu\text{mol/s}$. A planta foi mantida sob o sistema de irradiação LED com uma PPF total de 325 $\mu\text{mol/s}$ durante 21 dias e sobre o mesmo tempo com uma lâmpada fluorescente branca fria. A porcentagem de radiação azul utilizada foi de cerca de 9% do fluxo total de fotônico fotossintéticos (PPF). Foi descoberto que as características físicas das plantas, como a forma, cor e textura da folha, não houve diferença. A eficiência de conversão de energia elétrica do sistema de LED vermelho era duas vezes maior que o das lâmpadas fluorescentes. (BULA R., 1991).

Em alguns estudos a comparação entre regimes espectrais usando lâmpadas fluorescentes brancas e LEDs vermelhos complementados com lâmpadas fluorescentes azuis revelaram que a lâmpadas fluorescentes sozinhas foram mais eficazes no crescimento de mudas de alface. Isso foi explicado, parcialmente, pelo fato de que na região espectral azul das lâmpadas fluorescentes brancas tinha algumas diferenças em relação ao espectro de lâmpadas fluorescentes azuis usadas em conjunto com o LEDs. Além disso, a quantidade de radiação UV emitida pelas lâmpadas brancas fluorescentes beneficiava a atividade das flavoproteínas na inibição ação dos hipocótilos. As lâmpadas fluorescentes brancas também emitem em regiões vermelho e infravermelho e, portanto, o fitocromo pode ter sido ativado de forma a justificar um efeito sobre o alongamento. Portanto concluiu se, que 15 a 30

$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$ de uma densidade de fluxo fotônico fotossintético (PPFD) com um fotoperíodo de 12 h de radiação azul seria aceitável para o crescimento da alface. (HOENECKE, 1992).

Em 1993, Shuji Nakamura desenvolveu o primeiro LED azul de alto brilho viável, com comprimento de onda de 450 nm, que é próximo ao máximo pico de absorção de fotorreceptores de carotenóides nas plantas. Este avanço permitiu um arranjo de uma fonte de luz completa de estado sólido para o crescimento das plantas. No mesmo ano, foi obtida mudas com bom crescimento utilizando apenas LEDs vermelhos e azuis. O regime espectral foi composto por uma mistura de 33% de azul e 67% de radiação vermelha (OKAMOTO, 1996). Depois disso, várias luminárias para câmara de crescimento foram desenvolvidas usando LEDs de baixa potência de radiação vermelho, azul e vermelho distante com comprimentos de onda de pico de 660 nm, 450 nm e 730 nm, respectivamente.

Crescimento aceitável de plantas de espinafre com apenas LED vermelho foi verificado quando comparados com plantas cultivadas sob lâmpadas fluorescentes, especialmente desenhadas para o crescimento de plantas. Foi utilizado um pequeno *array* de LEDs vermelhos de alta potencia contendo 765 LEDs, com comprimento de onda de 660nm, uma intensidade de luz de $125 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$ e uma distancia de 20cm da planta. As plantas cultivadas sob LEDs vermelhos ficaram duas vezes maior e teve área foliar duas vezes menor do que as plantas cultivadas sob lâmpadas fluorescentes. Com base nisso, uma associação entre o alargamento da folha de espinafre e luz azul foi estabelecido. (YANAGI, 1997).

A importância da luz azul foi estudada para plantas de pimenta (*Capsicum annuum* L.cv., *Hungarian Wax*). O objetivo principal era comparar as características anatômicas de folhas e hastes de plantas de pimenta cultivadas sob diferentes regimes espectrais fornecidos por LEDs. Verificou-se que a ausência de fótons azuis ou um aumento na relação vermelho e vermelho distante pode reduzir a espessura dos tecidos mesófilos na pimenta. Foi descoberto que $4 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$ (cerca de 1% do PPF total) era a quantidade mínima de radiação azul necessária para complementar a emissão de LEDs vermelhos para realização da maior parte do crescimento de plantas diferenças e que baixos níveis de luz azul podem induzir mudanças dramáticas na anatomia das plantas de pimenta. (SCHUERGER, 1997)

A importância da composição espectral da luz no controle do desenvolvimento de doenças foi avaliada usando LEDs. Observou-se que a doença causada pelo vírus do tomate (ToMV) em plantas de pimenta (*Capsicum annuum* L.) se desenvolveu mais devagar e foi menos grave, sob sistemas de iluminação emitidos nas regiões azul e UV-A, com lâmpada de vapor de sódio e LEDs de comprimento de onda 660nm e lâmpada fluorescente azul, em

comparação com plantas cultivadas sob fontes de luz que não tinham comprimentos de onda no azul e UV, LEDs de comprimento de onda 660 e 660/735. As plantas foram cultivadas em um fluxo de fóton médio (300 a 800 nm) com um PPF de $330 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$ em um fotoperíodo de 12 horas. Já para o oídio, uma espécie de fungo, [*Sphaerotheca fuliginea* (*Schlectend: Fr.*) *Pollaci*] no pepino (*Cucumis sativus L.*) o número de colônias de oídio, uma espécie de fungo, por folha nas plantas de pepino foram maiores nas folhas cultivadas sob fontes de luz com maior emissão em regiões azul e UV-A. O uso de vermelho distante junto com LEDs vermelhos com comprimentos de onda de pico de 735 nm e 660 nm, respectivamente, aumentou a contagem de colônias por folha de oídio em pepino. Finalmente, concluiu-se que os LEDs com comprimentos de onda de pico nas regiões azul, UV-A e possivelmente vermelho distante (FR) podem modificar o desenvolvimento de doença nas plantas. No entanto, os mecanismos que interferem com o desenvolvimento dessas doenças não foi completamente revelado. (SCHUERGER, 1997)

No experimento com plantas de rabanete, alface e espinafres cultivados por 21 dias com PPF igual a $300 \mu\text{mol}/\text{s}$ e um fotoperíodo de 18 horas de luz e 6 horas de escuro foi usado para rabanete e alface e 12 horas de luz, 12 horas escuras, para espinafre. Os resultados indicaram que o LED vermelho sozinho é inaceitável para o bom crescimento da alface, rabanete e espinafre. A adição de luz azul melhorou muito o crescimento, mas isso ainda não era tão bom quanto às lâmpadas fluorescentes brancas para rabanete e espinafre. No entanto, um bom crescimento da alface pode ser alcançado apenas com LEDs vermelhos e azuis. Para rabanete e espinafre, pode ter faltado outro comprimento de onda para um crescimento ótimo. (YORIO, 2001).

Além disso, foi descoberto que a luz azul não é o único motivo para as diferenças de crescimento em plantas cultivadas hidropônicamente. Os tratamentos leves realizados com a mesma quantidade de fótons azuis (6%) produziram concentrações de clorofila significativamente diferentes, massas secas e área das folhas especificamente para a alface. Os mesmos resultados foram obtidos e confirmados em dois níveis de PPF de 200 e $500 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$. Parece que, na alface, certos comprimentos de onda atuam em conjunto com luz azul para afetar o crescimento das plantas. Concluiu-se também que a luz "amarela" (580 - 600 nm) parece inibir o crescimento da alface pela supressão da formação de clorofila ou cloroplasto. Esta característica pode ser única para algumas espécies, incluindo a alface. No entanto, as descobertas dos efeitos da luz amarela e verde no crescimento das plantas ainda são controversas. (DOUGHER, 2001)

Os efeitos e a interação de diferentes regiões espectrais na condutância estomática no comportamento das plantas de alface foi avaliado em quatro tratamentos diferentes usando LEDs vermelho e azuis, LEDs vermelhos e azuis suplementados com lâmpadas fluorescentes verdes, lâmpadas fluorescentes verde e , lâmpadas fluorescentes brancas frias [59]. Todos os tratamentos tiveram o mesmo fotoperíodo de 18 horas de luz e 6 horas de escuro e PPF semelhante e constante de cerca de $150 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. Os resultados mostraram que a área foliar foi maior em lâmpadas fluorescentes verdes seguido pelo LED vermelho e azul, LEDs vermelhos e azuis suplementados com lâmpadas fluorescentes verde e por ultimo lâmpadas fluorescentes brancas. A área foliar e a massa fresca foi maior em plantas cultivadas sob LEDs vermelhos e azuis suplementados com lâmpadas fluorescentes verdes, seguidas por lâmpadas fluorescentes brancas, LEDs vermelhos e azuis e lâmpadas fluorescentes verdes. A massa seca do tiro tinha similar evolução, este foi o mais alto em LEDs vermelhos e azuis suplementados com tratamento com lâmpadas fluorescentes verdes, seguidas de LEDs vermelhos e azuis, lâmpadas fluorescentes brancas, e lâmpadas fluorescentes verdes. As diferenças de crescimento pareciam ser originadas de diferenças na quantidade de luz verde em vez de mudanças na luz vermelha, considerando que a quantidade de radiação de vermelho distante era muito baixa e a influência do nível da luz azul era insignificante. O mesmo experimento também verificou que a luz verde pode reverter à luz azul-estimulada na abertura estomática em plantas de alface. (KIM, 2004)

Uma instalação de iluminação de componentes de estado sólido de LEDs de alto brilho com pico de emissão a 640, 660, 455 e 735 nm, respectivamente, foram utilizados com sucesso para estudar certos aspectos fisiológicos das plantas de rabanete, cebola e alface. Descobriu-se que o tratamento de luz mais eficaz para a acumulação de massa verde e uma morfogênese mais equilibrada foi composta por 6,4% de azul, 85% de laranja, 6,6% vermelho e 2% de vermelho distante. O fotoperíodo utilizado foi de 16 horas de luz e 8 horas escuro com um regime térmico de 21 / 17°C. (TAMULAITIS, 2004).

A luz azul fornecida por LEDs de alto brilho, no comprimento de onda de 455 nm, foi testada com lâmpadas de vapor sódio de alta pressão para o cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* 'Trust') e de pepino (*Cucumis sativus* 'Bodega'). A combinação de iluminação com lâmpadas de sódio de alta pressão e luz de LED azul resultou em aumento de biomassa vegetal e produção de frutas, mas não compensa o efeito negativo dos fotoperíodos estendidos. (MÉNARD, 2006)

Um experimento realizado durante o inverno no sul da Finlândia em estufa com duas mesas de crescimento, uma com LED e outra com vapor de sódio rodeadas por cortinas *black*

out brancas, como mostra a Figura 20. As luminárias de vapor de sódio de alta pressão e as luminárias de LED foram instaladas a aproximadamente 90 e 32 cm, respectivamente, acima dos vasos de alface (*Lactuca sativa var. crispata L.*) e a media total de PPF utilizado nesse teste foi de 180 $\mu\text{mol/s}$. O objetivo do ensaio foi avaliar a luminária com melhor desenvolvimento para as plantas de alface. Foi utilizado LEDs com emissões de pico de comprimento de onda de 630 nm e 460 nm. Como resultados as plantas cultivadas sob a luz dos LEDs eram mais fortes e tinham maior teor de matéria seca e a cor verde escuro, o que pode ser uma indicação de maior concentração de clorofilas, quando comparado com as plantas cultivadas com lâmpadas de vapor de sódio. Esses resultados indicam maior eficiência da utilização da luz pela planta, resultando em maior atividade fotossintética e valor nutricional. (PINHO, 2008).



Figura 21: Imagem dos dois tipos de cultivo à esquerda com luminárias LED e a direita com luminárias de vapor de sódio de alta pressão (PINHO T., 2008).

Foi feito um estudo com o objetivo de comparar a iluminação LED suplementar com iluminação HPS suplementar em termos de crescimento e morfologia da planta. Houve três tratamentos: 1) LED azul (comprimento de onda de pico 443 nm); 2) LED vermelho (comprimento de onda de pico 633 nm); e 3) HPS, para fornecer $3,7 \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ (radiação solar de fundo de $6,3 \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$). As plantas de pepino (*Cucumis sativus*) no estágio de transplante (26 a 37 dias) sob HPS apresentaram massa seca 28% maior do que as plantas sob os tratamentos LED, isso pode ser atribuído à maior temperatura da folha sob o tratamento HPS. Não foram observadas diferenças nos parâmetros de crescimento (massa seca, peso fresco ou número de folhas) entre os tratamentos LED azul e vermelho. As plantas sob o tratamento LED azul apresentaram maior taxa de fotossíntese líquida do que aquelas sob o LED vermelho e os tratamentos HPS. As plantas sob o LED azul e os tratamentos HPS apresentaram um comprimento de hipocótilo de 46% e 61% maior do que aqueles sob o LED vermelho, respectivamente. Em resumo, o LED vermelho suplementar produziu uma

compacidade de planta desejável e a HPS apresentou maior eficiência de fixação que os LEDs. (HERNÁNDEZ, 2015)

O espectro de luz é muito importante para o planejamento da lâmpada para complementar ou substituir a luz. Existe uma conexão direta entre fotossíntese e espectro de radiação fotossintetizada (PAR). Os comprimentos de onda mais eficientes para a fotossíntese são 660nm vermelhos e o azul 430-450nm. A luz com maior proporção de espectro vermelho, especialmente com pico em 660nm é melhor para floração e frutificação e desenvolvimento de raiz. O espectro azul ajuda a desenvolver inibidores do crescimento que promovem a formação da planta, melhoram a densidade e a espessura do caule e das folhas. (SMITT, 2016). Para diferentes plantas, bem como para diferentes estágios de desenvolvimento, são necessárias diferentes proporções de espectros vermelhos e azuis. Muitas pesquisas estão sendo feitas agora para otimizar os espectros e criar receitas de luz perfeitas para um uso eficiente das luzes LED focadas na horticultura. Vários experimentos hortícolas com batata, rabanete (YORIO, 2001) e alface (STUTTE, 2009) mostrou a exigência de luz azul (400-500 nm) para maior biomassa e área de folha. No entanto, diferentes comprimentos de onda de vermelho (660, 670, 680 e 690 nm) e azul (430, 440, 460 e 475 nm), podem ter efeitos desiguais nas plantas, dependendo das espécies. (SIMS 1992) (GOINS 2001) (LI, 2012) A luz vermelho distante (FR) (700-725 nm) que está além da PAR mostrou ajudar no crescimento e fotossíntese da planta. (STUTTE, 2009) (GOINS 2001).

Estudos apontam que a clorofila absorve luz principalmente nas frações azul, verde e vermelha do espectro, mas absorve pouca nas frações laranja e amarela. Portanto, a iluminação a LED se mostra vantajosa nesse aspecto visto que seu espectro pode ser composto por arranjos discreto de emissão em regiões diferentes do espectro para alcançar a máxima eficácia e, simultaneamente, atender as atividades morfológicas da planta. Em contrapartida, as luminárias fluorescentes e vapor de sódio não possuem esta flexibilidade. Estudos têm demonstrado que a floração e os padrões de germinação são influenciados pela luz verde e que a frequência da luz também influencia a biomassa de certas plantas, bem como seu conteúdo nutricional. Assim a luz verde também contribui para o crescimento e o desenvolvimento da planta. Ainda não é bem compreendida a forma como diferentes frequências de luz influenciam crescimento, biomassa e teor nutricional da planta. Neste contexto, atualmente, pesquisadores estudam o fenômeno no intuito de caracterizá-lo e discretizar reações fisiológicas por intervalos de espectro. (SINGH D., 2014) (HERNÁNDEZ, 2015)

Os estudos anteriores mostraram que a fotossíntese, fotomorfogênese, germinação, floração, acumulação de biomassa e composição fitoquímica das culturas podem ser controladas e otimizadas pelo espectro de luz fornecida por LEDs. Assim, é esperável que a indústria de produção de alimentos e os consumidores possam se beneficiar ainda mais com o uso de LEDs para crescimento de plantas no futuro. No entanto, mais trabalhos de pesquisa ainda precisam ser realizados para desvendar e compreender melhor os efeitos causados pelas regiões espectrais verdes e amarelas no desenvolvimento das culturas. Além disso, a interação e sobreposição de respostas fisiológicas entre grupo de fotorreceptores continua a ser esclarecido.

Embora o crescimento aceitável de culturas de vegetais, como a alface, tenha sido alcançado usando LEDs vermelhos e azuis, outras culturas como rabanete e espinafre podem exigir luz com melhor composição espectral.

4 SOBRE O LÚPULO

Os lúpulos (*Humulus lupulus*) são plantas herbáceas, perenes, resistentes, de vida longa, da família *Cannabaceae*, comumente propagado a partir de rizomas e geralmente cultivadas por seus estróbilos ou cones secos, que são gerados da inflorescência da planta feminina. (PEARSON, 2016). O lúpulo é geralmente cultivado em um sistema de treliça, variando em altura de 3.6m a 8m. Por serem plantas grandes e de rápido crescimento, o lúpulo requer uma grande quantidade de energia solar, bem como água e nutrientes. (Kneen, 2017). Na figura 22, é apresentada uma plantação de lúpulo.



Figura 22: Plantação de lúpulo. Fonte: <http://gourmetdemexico.com.mx/>

Seus cones produzem uma resina que se chama lupulina, e esta contém ácidos alfa e beta e óleos de lúpulo e cada um contribuem um pouco para o processo de fabricação de cerveja. O ácido alfa (α) é o componente responsável pelo amargor na cerveja. A porcentagem de óleo de lúpulo é usada para determinar o aroma e qualidades de um determinado lúpulo. O lúpulo tem propriedade bacteriostática no mosto cervejeiro que previnem a maioria das contaminações por bactérias Gram-positivas e conseqüentemente a deterioração da cerveja. Atualmente, a concentração de ácido α é a principal medida usada para descrever o rendimento das culturas de lúpulo. A concentração desses compostos depende da idade da planta, do tipo de cultivo e das condições ambientais associado à localização da produção do lúpulo, variando muito na sua quantidade de 2% até 20% do peso seco total. (TAVARES, 2017).



Figura 23: Cones do lúpulo. Fonte: <http://cervejaemalte.com.br/>

A planta do lúpulo é nativa de lugares de latitudes mais altas zonas temperadas do Hemisfério Norte, apresentando melhores respostas de crescimento em locais que compartilham perfil de temperatura, precipitação e fotoperíodo nas latitudes de 35° a 55° norte ou sul. O lúpulo pode ser cultivado fora estas latitudes, mas é improvável que elas produzam cones. (KNEEN, R.). Portanto, um cultivo bem sucedido depende, em grande parte, da emulação dessas condições abióticas de temperatura, radiação, água e nutrientes do solo em um ambiente interno de estufa.

Top Hop Growers

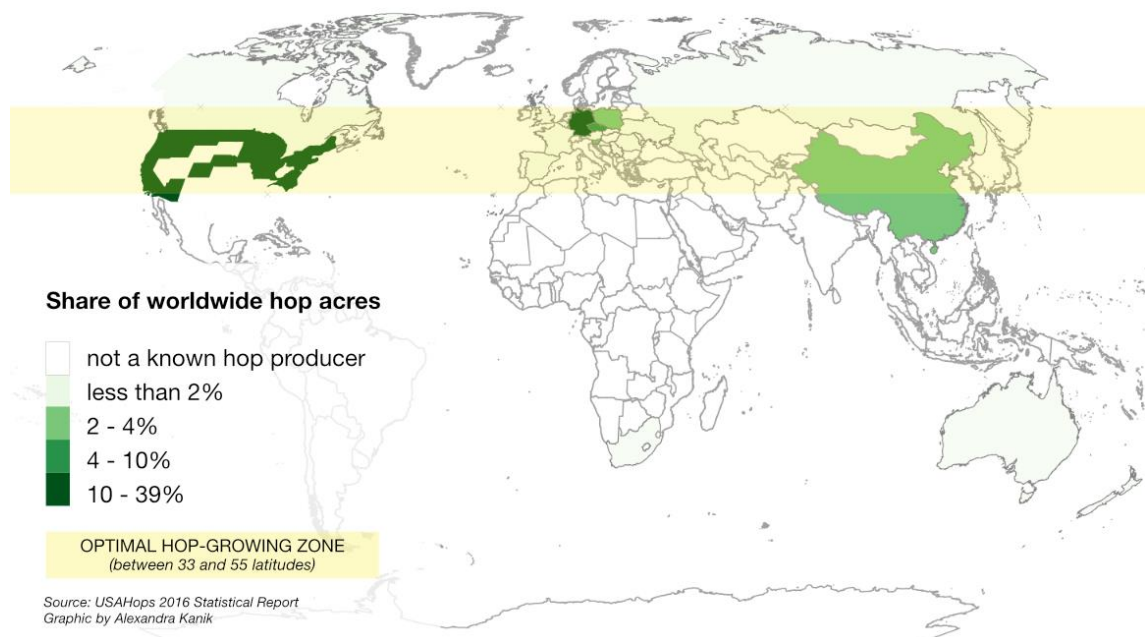


Figura 24: Maiores produtores de lúpulos no mundo comprovando a região de latitude entre 35 a 55 graus. Fonte: <http://ohiovalleyresource.org/>

O fotoperíodo da planta do lúpulo tem um papel muito importante no seu crescimento e na indução da floração. Como plantas de dia curto (do inglês *short-day-plants*) (SDP) (PEARSON, 2016)., eles precisam de um longo período de escuridão ininterrupta para florescer e não necessariamente luz ininterrupta durante a emulação de luz do dia. Isso é conveniente em cultivo em sistemas internos, pois pode acontecer interrupções na iluminação devido a distúrbios da fonte de alimentação, porém a saúde da planta não será comprometida. (TAIZ, 2017). Estudos apontam que, no estágio de crescimento (vegetativo), o regime ideal de fotoperíodo para o lúpulo é de 16 horas de duração do dia. (PEARSON, 2016). Esses aspectos destacam a necessidade de um controle de fotoperíodo no sistema do *driver* do LED para emular diferentes regimes de fotoperíodo para diferentes estágios de desenvolvimento das plantas (como o vegetativo e a floração). Além disso, os diferentes estágios de crescimento e o período de floração exigem diferentes níveis de radiação, portanto, o *driver* deve ser controlado para adequar a irradiância para cada condição, mantendo o espectro mais eficiente.

A Alemanha lidera produção mundial de lúpulo, produzindo 41% da produção global em 38.399.769 kg em 17.308 há. Os Estados Unidos são o segundo maior produtor mundial de lúpulo com 34% de produção em 32.203.697 kg em uma estimativa 15,738 ha. A produção de lúpulo nos Estados Unidos está centrado no noroeste do Pacífico (Washington, Oregon e Idaho são os maiores produtores). Em 2014, Washington produziu 79% do lúpulo da nação. A produção fora do O noroeste do Pacífico representa apenas 2% da área comercial nos Estados Unidos. No entanto, há bastante interesse em cultivar o lúpulo fora desta área, isto vem crescendo muito com a crescente demanda por produtos para produção de cerveja artesanal, que é do interesse de agricultores locais. Apesar dos dados disponíveis serem limitados, há também algum cultivo na Florida, que fica bem no sul do país. (PEARSON, 2016)

O aumento da produção de cerveja em indústrias e cervejas artesanais implícita em um aumento da demanda de cones de lúpulo em países que não necessariamente tem características externas adequadas para o cultivo da planta. Portanto, a criação de um sistema viável de pequena escala para o cultivo interno é algo muito atraente para o mercado local, pois evita taxas de importação e aumenta a estabilidade da cultura como produto, evitando também degradações dos processos de armazenamento e transporte, conhecidos por reduzir significativamente a concentração de ácido do produto final. (TAVARES, 2017).

Neste contexto, este trabalho propõe uma maneira alternativa de cultivar lúpulo sob condições internas de estufa com controle de temperatura, umidade do solo, concentrações de O₂ / CO₂ e - o mais importante, a radiação incidente de fluxo nas plantas, que é o principal

tema de interesse nesse projeto. O experimento em curso envolve nove lúpulos clones divididos em grupos de três plantas, por três ambientes de iluminação:

- Luz natural com experimento de controle externo, sem gerenciamento de qualidade ou espectro de iluminação.
- Lâmpadas convencionais de vapor de sódio com experimento de controle interno, apenas descontínuo, isto é, controle ON-OFF de iluminação.
- Matriz de lâmpadas LED vermelhas e azul experimento de controle interno, e *driver* permitindo o controle do espectro de iluminação e controle contínuo da intensidade da luz.

Estes dois últimos ambientes estão representados na figura 25, por meio da organização do cultivo interno para as lâmpadas de vapor de sódio e LED.

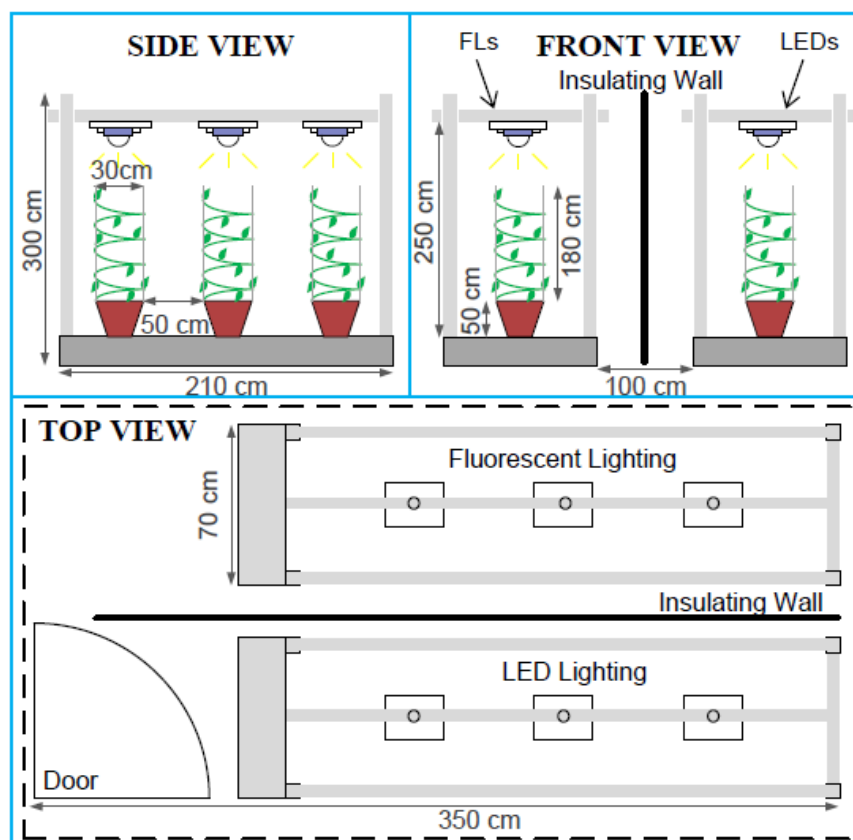


Figura 25: Arranjo interno (em estufa) para o crescimento do lúpulo com lâmpadas de vapor de sódio e iluminação LED. As lâmpadas de vapor de sódio são usadas para comparação, já que são empregadas, como tecnologia convencional, em muitas estufas. (TAVARES, 2017).

Para controlar o fluxo radiante para as três plantas sob iluminação LED, um *driver* de dois canais foi desenvolvido para alimentar uma série de 54 LEDs vermelhos (canal R) além de uma série de 18 LEDs azuis (canal B). Os arranjos de cada cor são alimentados separadamente, de modo que, a quantidade de luz vermelha e azul pode ser ajustada em tempo

real para o espectro apropriado de vermelho e azul em diferentes estádios de crescimento, bem como a intensidade de energia radiante emitido por cada canal.

A experiência de controle para a lâmpada de vapor de sódio tem a restrição de que o espectro não pode ser manipulado, e o único meio de controlar o fotoperíodo é ligando ou desligando as luzes, assim a intensidade não pode ser controlada. Porém é muito importante que o seu máximo resultante de irradiação nas plantas (PPFD medida $\mu\text{mol} / \text{m}^2.\text{s}$) seja compatível com a irradiação resultante da luminária LED.

5. ANÁLISE DA LUMINÁRIA LED

5.1 CONSIDERAÇÕES DO BALANÇO DE ESPECTRO

A distribuição espectral da radiação luminosa influencia diretamente no desenvolvimento e crescimento das plantas. O pesquisador McCree (1972a) observou que o rendimento quântico relativo à fotossíntese das plantas de cultivo tem dois picos a 432 nm e 670 nm, razão pela qual as folhas são verdes. Ele também notou, o efeito de Emerson, que afirma que a fotossíntese na presença de dois ou mais comprimentos de onda pode ser mais eficiente do que quando se utiliza seus comprimentos de onda individuais. (ASHDOWN, 2014).

Uma vantagem importante da iluminação baseada em LED, em relação às luminárias convencionais, é a possibilidade de controle da emissão de fluxo e do espectro da luz. Ao selecionar o espectro de luz mais apropriado, o crescimento da planta em termos de fotossíntese e morfogênese das culturas pode ser otimizado. O controle do espectro de luz permite a otimização da fotossíntese e fornece controle de crescimento adicional ao cultivo.

Com o objetivo de produzir uma fonte de luz elevada eficácia (relação PFFD/potência elétrica) optou-se por utilizar dois tipos de LED, na região do espectro que compreendem aos picos de eficiência da curva RQE (Figura 21). Como visto na revisão bibliográfica, estes são os principais comprimentos de onda utilizados na fotossíntese, porém, pode haver outros adicionais que sejam importantes para esta espécie de planta, assim, para um experimento inicial, optou-se por escolher primeiramente os dois comprimentos de onda principais, e a partir deste, medir o desenvolvimento da planta.

Os picos de eficiência fotossintética da planta são ao redor de 660 nm vermelho e azul 430-450 nm. O espectro azul ajuda a desenvolver inibidores do crescimento que promovem a formação da planta, melhoram a densidade e a espessura do caule e das folhas. A luz com maior proporção de espectro vermelho, especialmente com pico em 660 nm é melhor para floração e frutificação e desenvolvimento de raiz. (SMITT, 2016).

No Laboratório de Fisiologia Vegetal da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), foi realizado o experimento para extrair a curva de absorvância total dos pigmentos de clorofila a, clorofila b e carotenóides da folha da planta *H. lupulus* 'Columbus' (um cultivar de lúpulo com alto grau de concentração de ácido alfa em seu estróbilo). Esta curva foi comparada com a curva de absorvância média de diferentes espécies de planta por referência do (PINHO, 2008). Na figura 21, os picos de absorvância da folha de lúpulo tem

comprimento de onda em 442nm e 674nm, o que está muito próximo aos valores encontrados na literatura e nos modelos de LEDs utilizados para o arranjo de luminária.

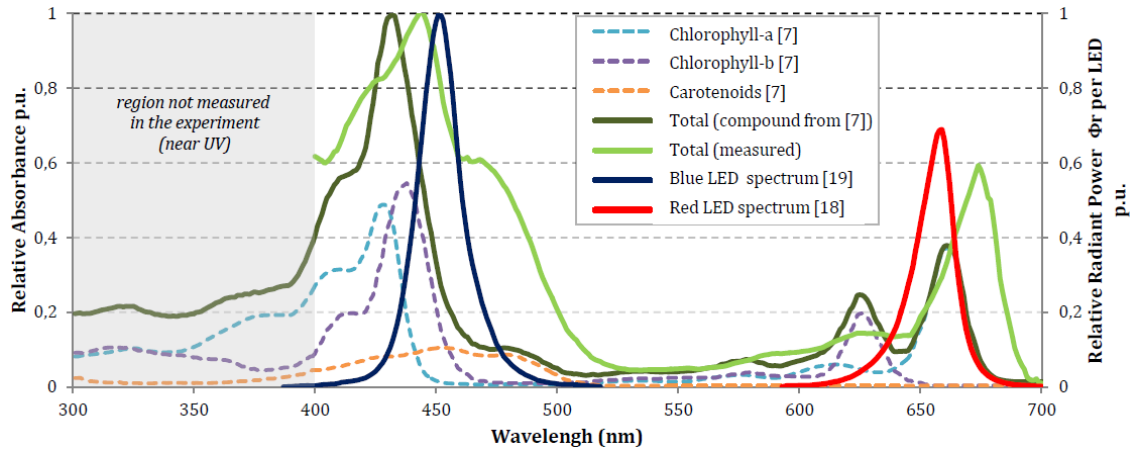


Figura 26: Comparação entre absorvância relativa de clorofilas a, b e carotenóides, pela referência do (PINHO, 2008), com a absorvância relativa medida no laboratório para uma folha de lúpulo de Colombo. Também são mostradas as distribuições de potência espectral relativa (SPD) dos LEDs vermelho e azul selecionado (ambos os LED SPDs são normalizados para o valor máximo de emissão do LED azul, que é o mais alto entre os dois). (TAVARES, 2017)

Apesar de os comprimentos de onda curtos terem maior absorvância, como mostrado na figura 26, a eficiência fotossintética não está simplesmente relacionada à absorvância relativa. Isso porque, a energia do fóton deve ser levada em conta na análise da radiação emitida para o crescimento de plantas. Os fótons de comprimento de onda mais curtos, região do azul, apresentam mais energia do que os fótons de comprimento de onda mais longo; e a sua ponderação envolve um fator de divisão maior, e portanto o número de fótons absorvidos pela região do vermelho é maior que o mesmo na região do azul. Assim, a maioria das plantas tende a usar a luz vermelha melhor devido à maior radiação de produção quântica em 620 nm, a radiação azul em 440 nm apresenta, em média, 70% do rendimento quântico de vermelho. (McCree. 1972).

O balanço espectral (ou seja, a quantidade de cada cor) também é um fator importante, sendo suscetível a mudanças em sua distribuição ótima de acordo com o estágio de crescimento da planta. Os horticultores escolhem equilibrar a proporção de luz vermelha para azul, dependendo das espécies específicas de plantas cultivadas, do seu estágio de crescimento, e do objetivo da cultura, frutificação, inflorescências ou biomassa, e na maioria destes, a luz vermelha domina o espectro. (PHILIPS, 2015) (SINGH, 2014). Esta combinação é a razão do porquê muitas luzes de crescimento aparecem na cor violeta. Algumas plantas

gostam de sombra, enquanto outras preferem a luz solar direta, com diferentes requisitos de distribuição de energia espectral da luz do sol (do inglês Sunlight Spectral Power Distribution) (SPD). Também, podem ser utilizados LEDs de 735 nm vermelhos distante para induzir a floração. Assim, este experimento propõe uma proporção de 2:1 vermelho para azul na razão de potência radiante máxima.

Deve-se notar, que devido à natureza do *driver* utilizado, a razão Vermelho: Azul não precisa ser fixada no valor nominal, pois os canais do *driver* são dimerizáveis e independentemente, facilitando o ajuste ótimo para a espécie e estágios de desenvolvimento da planta.

5.2 MODELO DE LEDS E ARRANJO UTILIZADO

Os LEDs escolhidos para o protótipo foram OSRON SSL Tipo 120, modelos GH CSSPM1.24 "*hyper red*", com comprimento de onda de 660 nm e GD CSSPM1.14 "*deep blue*", com comprimento de onda de 451 nm, disponíveis no datasheet em anexo, ambos fabricados por OSRAM Opto Semiconductors. Esses modelos foram escolhidos de acordo com a análise anterior sobre os picos de pigmentos da clorofila (Figura 21) e disponibilidade de LEDs no mercado. Ambos os espectros de LEDs são apresentados na Tabela 1, e seus espectros foram normalizados para o pico de emissão do mais energético e eficiente (LED azul profundo).

Os LEDs escolhidos são de alta eficiência e durabilidade, assim como seus picos de radiação no espectro estão condizentes com o que é aplicado na literatura. (SMITT, 2016), (SINGH, 2014), (ASHDOWN, 2014). A tabela a seguir, ilustra dados comparativos importantes sobre os respectivos LEDs:

LEDs	Deep Blue	Hyper Red
Comprimento de onda (λ)	451nm	660nm
Ângulo de iluminação ($2\theta_{1/2}$)	120°	120°
Fluxo Radiante (ϕ)	690mW	425mW
Eficiência Radiante (η)	69%	56%
Corrente (I)	350mA	350mA

Tabela 1: Comparação entre aspectos dos dois LEDs utilizados

Devido à saída radiante relativamente baixa de LEDs em comparação com as fontes de luz convencional, as luminárias LED, geralmente, são compostas por um número discreto de LEDs conectados juntos para formar uma matriz. Uma das principais preocupações de estudos botânicos para desenvolvimento de plantas é determinar a quantidade de luz artificial adequada para ser usada. Cada espécie vegetal apresenta uma intensidade de luz ideal, que maximiza o crescimento e a realização da fotossíntese. Quando não há irradiância fotossintética suficiente, o desenvolvimento das plantas pode ser seriamente prejudicado. Já em caso de irradiância fotossintética excessiva, a fotossíntese pode ser fotoinibida, e o crescimento das plantas, prejudicado, o que contribui, ainda, para o desperdício de energia elétrica, pois as necessidades fisiológicas da planta poderiam ser atendidas com um menor fluxo radiante gerado. Portanto, a qualidade e intensidade da luz são elementos decisivos para as plantas, pois esses parâmetros influenciam no crescimento, desenvolvimento, e produção sendo o produto final flor, fruto raízes ou folhas.

O arranjo da luminária de dois canais é composta por um matriz de 54 LEDs vermelhos (660 nm, 425 mW a 350 mA), o canal R, e um conjunto de 18 LEDs azuis (451 nm, 690 mW a 350 mA) - o canal B. A máxima corrente escolhida para ambos é 500 mA, e os LEDs estão associados em série. O canal R totaliza o máximo de energia elétrica de 60 W e 34 W de potência radiante com uma eficiência radiante de $\eta_R = 56\%$, enquanto o canal B totaliza um potência elétrica máxima de 26 W e 18 W de potência radiante pois sua eficiência radiante é $\eta_B = 69\%$. Portanto, o arranjo corresponde aproximadamente a uma proporção de 2:1 no fluxo radiante ($\Phi_R : \Phi_B$) quando ambos os canais são conduzidos sob potência máxima (86 W no total), embora a proporção no número real de LEDs seja 3:1 ($n_R : n_B$). As razões de fluxo e numero de LEDs ($\Phi_R : \Phi_B$ e $n_R : n_B$) diferem por causa das diferentes tensões dos LEDs vermelhos e azuis, que afetam a energia elétrica, e suas eficiências radiante diferentes.

Verificou-se que 54 LEDs vermelhos mais 18 LEDs azuis atenderiam a demanda de três plantas adultas de lúpulo, acima do seu ponto de compensação fótico, sem comprometer o seu rendimento. A luminária totaliza 52 W de potência radiante, sendo 34 W de luz vermelha e 18 W de luz azul e isso corresponde a 11 W de LEDs vermelho para 6 W de LEDs azuis para cada uma das plantas, ou aproximadamente, 17 W de energia radiante total por planta.

Este arranjo tem certa disposição LED, ilustrada na Figura 27. Eles são agrupados em "blocos" de 4 LEDs (3 vermelhos, 1 azul), e seis desses blocos formam um "módulo". Os "blocos" foram projetados de forma a manter a uniformidade do campo de irradiância na mistura do espectro azul com o vermelho. Todos os LEDs compartilham do mesmo dissipador

de calor e todos os componentes de cada canal são conectados em série. Cada um dos "módulos" deve atender minimamente um exemplar de lúpulo adulto.

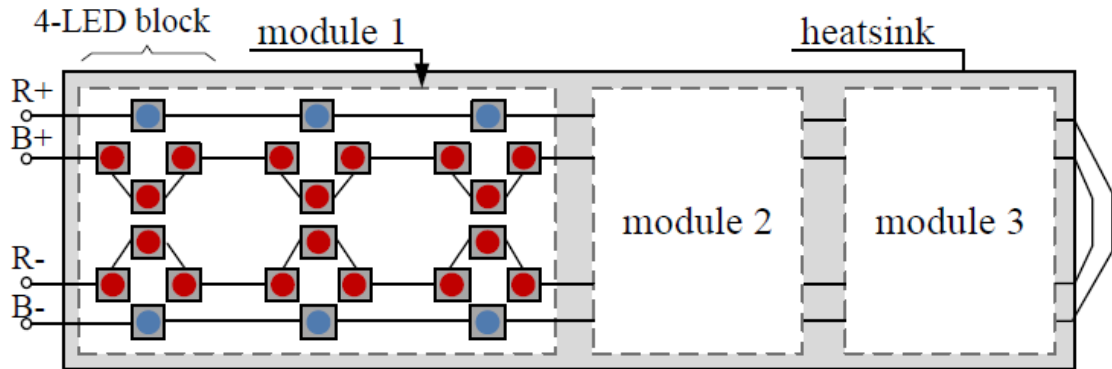


Figura 27: O arranjo da luminária LED com 54 LEDs vermelhos e 18 LEDs azuis, projetado para iluminar três plantas de lúpulo. Os "módulos" são idênticos, e contem 6 blocos, compreendendo 2 canais (V e A) cada, com todos os LEDs em cada canal conectado em série e ambos os canais compartilhando um dissipador de calor comum. (P. L. Tavares. 2017)

5.3 PROJETO DA LUMINÁRIA

Os LEDs têm emissão espacial semi-isotrópica, o que os torna emissores direcionais. No entanto, alguns dos fótons emitidos se propagam em direções definidas por grandes ângulos de visão. Assim, dependendo da altura de montagem, uma parte significativa da luz emitida pode ser mal utilizada. Como o LED escolhido tem um ângulo de iluminação de 120° , decidiu-se por utilizá-los a uma altura de 30 cm da planta para que consiga atingir todo o raio em que a planta se encontra. A distância entre a planta e a luminária colabora para atingir um maior PFFD já que sua intensidade é inversamente proporcional ao quadrado desta distância. Porém, deve-se obedecer a uma distância limite de acordo com a temperatura medida no canopi da planta para que a temperatura gerada pela luminária não provoque queima das folhas superiores.

5.4 CONSIDERAÇÕES DO PERFIL TÉRMICO DO LED OBSERVADO EM EXPERIMENTOS EM LABORATÓRIO

Os fótons gerados na região ativa são parcialmente absorvidos dentro do dispositivo devido à configuração da estrutura interna, o que resulta em perdas de calor. Perdas térmicas adicionais são geradas devido a obstáculos de materiais que envolvem as camadas de contato

que compõe o *chip* semiconductor. Essas perdas de calor devem ser conduzidas para o exterior do LED para evitar sua falha prematura. O aquecimento da junção pode acarretar diversos problemas: deslocamento cromático, redução de fluxo luminoso, degradação acelerada do *chip* e do encapsulamento e até mesmo, a falha catastrófica e prematura do dispositivo. (LAUBSCH et al., 2010). Portanto, soluções de resfriamento passivas ou ativas devem ser empregadas para minimizar o efeito negativo do aumento da temperatura no desempenho óptico e elétrico dos LEDs.

Para o acionamento do LED de alta potência é mandatório o uso de um dissipador térmico. Na ausência dele, aumenta-se o impacto do auto-aquecimento do *chip* e o calor gerado que não é dissipado, implica em um decréscimo visível na capacidade do LED de emitir luz. O dimensionamento da dissipação pode ser feito por meio de simples circuitos térmicos ou, de uma forma mais completa, empregando correlações entre as características térmicas de dissipadores (resistência térmica) e características elétricas e radiométricas dos LEDs. (ALMEIDA, 2014b)

O gerenciamento térmico de LEDs de alta potência depende principalmente da condução e, da convecção natural do calor gerado durante a operação. Portanto, a resistência térmica do caminho de calor da junção para o exterior do dispositivo deve ser a menor possível no projeto para não afetar drasticamente a confiabilidade e desempenho. Com frequência, sistemas de resfriamento externos são usados para evitar que a temperatura de junção supere a temperatura máxima permitida definida pelo fabricante.

Em geral, os dados técnicos do LED fornecidos pela ficha técnica do fabricante são baseados em operação a temperaturas de junção de 25° C. Na maioria das aplicações, a operação nessa temperatura de junção não é possível e costuma ser maior. Isso resulta em uma diminuição da produção de luz, tornando a gestão térmica um aspecto de design importante. Portanto, a temperatura ambiente máxima esperada durante a operação do LED ou o sistema LED deve ser usada para determinar o valor apropriado da resistência térmica do sistema de resfriamento externo.

Para a luminária de LED projetada foi utilizado também dois cooler para que o dissipador se esfriasse mais rápido, e assim, mantivessem-se as características originais do LED. O experimento com a luminária pode ser agrupado em dois grandes ensaios: o primeiro feito sem ventilação forçada e o segundo com ventilação forçada.

5.5 CARACTERÍSTICAS DO LED E MODELO PET DO ARRANJO

O espectro do LED e seus parâmetros radiométricos relevantes, como o fluxo radiante (Φ_x), eficácia luminosa, temperatura de cor (do inglês *correlated color temperature*) (CCT), coordenadas cromáticas e espectro são extremamente dependentes de parâmetros térmicos e elétricos. Os parâmetros térmicos são dissipação, temperatura ambiente e temperatura de junção, e os elétricos se caracterizam por corrente de acionamento, potência dissipada e parâmetros elétricos do modelo equivalente. O modelo foto-eleto-térmico (do inglês, *photo-electro-thermal*, PET) vincula esses três fatores de maneira a estimar o fluxo radiante do LED e visualizar possíveis pontos de operação e projetos ideais. Além de ser uma ferramenta útil para o design do sistema, também fornece uma estrutura matemática para estimativa de fluxo radiante em cada um dos canais do sistema de LED dos dois canais proposto. A partir de medidas de parâmetros elétricos (tensão e corrente), pode-se estimar o fluxo e, assim, controlá-lo indiretamente.

A figura 28, apresenta estas interações representadas qualitativamente. As influências positivas são aquelas que trabalham para aumentar um determinado parâmetro do sistema (por exemplo, o aumento da corrente direta causa um aumento na tensão direta, no fluxo luminoso e na potência dissipada) e as influências negativas trabalham para reduzir um determinado parâmetro (por exemplo, o aumento da temperatura de junção causa redução no fluxo luminoso e na tensão direta). O estado de regime fotoeletrotérmico de um sistema LED é resultado destas interações e podem ser quantificadas a partir de modelos matemáticos que serão detalhados neste capítulo.

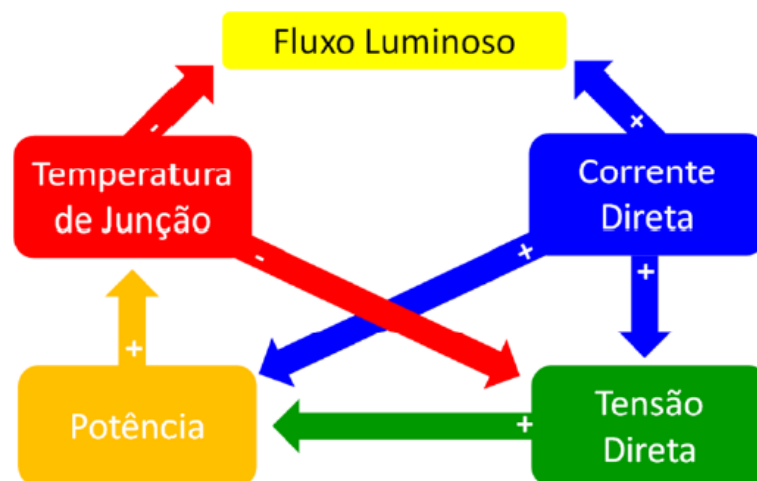


Figura 28: Interações entre a grandeza térmicas, elétricas e fotométricas em um sistema de iluminação semicondutora (BENDER, 2012).

Esta seção usa a análise PET estática proposta por (ALMEIDA, 2014b) para fornecer um modelo matemático para ambos os canais de LED utilizados neste trabalho, vermelho e azul, desenvolvendo as equações que serão utilizadas na estimativa de fluxo e no controle de ambos os arranjos de LEDs do *driver*.

Já foi visto que o modelo elétrico equivalente do LED, quando operando acima do joelho da curva de polarização direta, é representado por uma resistência dinâmica (r_d) em série com uma fonte de tensão de limiar (V_t) e um diodo ideal para representar a unidirecionalidade de corrente. Este modelo representa uma situação ideal, pois estes dois parâmetros elétricos (r_d e V_t) não variam com a temperatura. Porém para uma análise fotoeletrotérmica, o efeito da temperatura deve ser levado em conta.

A tensão de limiar decresce monotonicamente com o aumento da temperatura, podendo ser considerada linear. Assim a diferença de potencial necessária a ser aplicada à junção p-n, para estabelecer um fluxo de elétrons, reduz com o aumento da temperatura, pois a barreira de potencial é reduzida. A tensão direta nos terminais do LED pode ser modelada matematicamente como será mostrado adiante.

Para obter um modelo eletrotérmico completo aproximado, é necessário também incluir o efeito da dissipação. E para isto foi utilizado um circuito térmico simplificado e em regime térmico do sistema LED-dissipador-ambiente. Quanto maior o número de LEDs maior será a temperatura do dissipador.

A Figura 29 apresenta o circuito elétrico térmico equivalente dos canais R e B no mesmo dissipador de calor considerando a dependência da tensão do LED na temperatura de junção (representado pela fonte de tensão com temperatura controlada) os efeitos do sistema de dissipação (representados pelas resistências térmicas e a temperatura ambiente) e a potência térmica dissipada pelos LEDs como uma função da potência elétrica. Será representado o circuito térmico apenas para o canal vermelho, mas a topologia é análoga para o canal B, variando apenas seus parâmetros específicos do LED azul.

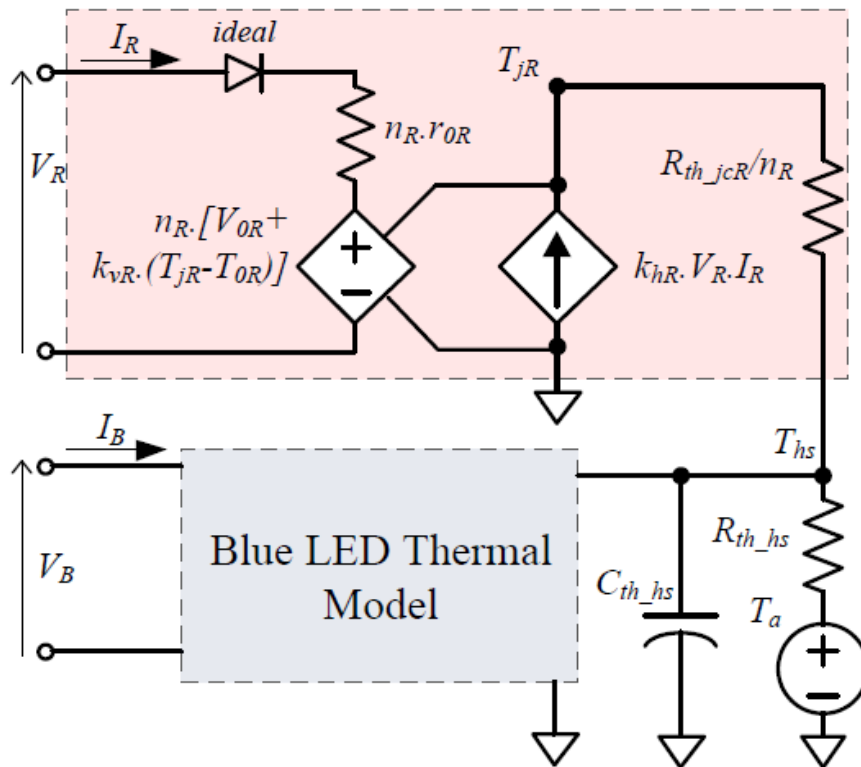


Figura 29: Modelo eletrotérmico completo aproximado dos canais de LED azul e vermelho assentados em um único dissipador. (TAVARES, 2017)

Os parâmetros para os canais vermelho e azul são respectivamente: V_R e V_B que são as tensões do terminal de todo o canal. I_R e I_B que representa as correntes em cada canal de LED, n_R e n_B que são os números de LEDs em série de cada canal, de acordo com o projeto realizado $n_R = 54$ e ; $n_B = 18$. r_{OR} e r_{OB} são as resistências equivalentes em série de cada LED único. V_{OR} e V_{OB} são a tensão de limiar ("joelho") de cada LED único. k_{vR} e k_{vB} são os coeficientes de LED que indicam a mudança da tensão com temperatura e são conhecidos por serem negativo. k_{hR} e k_{hB} são coeficientes de conversão de potencia elétrica para potência térmica, ou seja, o complemento de eficiência radiante de cada LED: $k_{hx} = 1 - \eta_x$, que fornece a quantidade de calor que cada LED produz em uma determinada potência. R_{th_jCR} e R_{th_jCB} são as resistências térmicas de junção de cada LED único e é obtido no catálogo do LED. T_{jR} e T_{jB} é a temperatura de junção de cada LED único e foi assumida igual para todos os LEDs do mesmo tipo, vermelho e azul. R_{th_hs} é a resistência térmica do todo dissipador de calor. Está será menor quanto maior for a capacidade de dissipação deste elemento. T_{hs} é a temperatura do dissipador de calor. A temperatura de junção T_{jx} e a temperatura do dissipador T_{hs} estão indicadas como tensões em nós do circuito térmico equivalente. C_{th_hs} é a capacitância térmica de todo o dissipador de calor. T_a é a temperatura ambiente. T_{OR} e T_{OB} são as

temperaturas de teste de cada dispositivo, conforme informado pelo fabricante no catálogo do LED; para ambos os LEDs utilizados $T_{0R} = T_{0B} = 25^\circ\text{C}$. I_{0R} e I_{0B} são as correntes de teste de cada dispositivo e conforme informado pelo fabricante no catálogo do LED para ambos os modelos de LEDs utilizados $I_{0R} = I_{0B} = 350\text{mA}$. O fabricante também fornece a classificação nominal dos fluxos radiais, Φ_{0x} , de cada LED único: $\Phi_{0R} = 425\text{mW}$ e $\Phi_{0B} = 690\text{mW}$ na corrente e temperatura de teste já mencionada.

"x" pode se referir ao "R" quando sua relação for ao canal vermelho ou "B" para o canal azul nas seguintes equações, isto se deve a igualdade de topologia do circuito eletrotérmico, apenas diferindo em seus valores de parâmetros.

A equação 10 expressa a tensão terminal de um canal de acordo com a linearidade dependente da temperatura do modelo de cada matriz de LED do circuito mostrado na Figura 29. Pode-se notar que a tensão terminal está relacionada à mudança na temperatura de junção ($T_{jx} - T_{0x}$), e esta pode ser utilizada para estimar a temperatura de junção se a corrente I_x é conhecida. Esta relação é expressa na equação 11, que foi obtida isolando T_{jx} em 10 e tornando-a uma função de V_x e I_x onde o subscrito x indica o canal vermelho (R) ou o azul (B) do LED.

$$V_x(I_x, T_{jx}) = n_x[r_{0x}I_x + V_{0x} + K_{vx}(T_{jx} - T_{0x})] \quad (10)$$

$$T_{jx}(V_x, I_x) = \frac{V_x/n_x - r_{0x}I_x - V_{0x}}{K_{vx}} + T_{0x} \quad (11)$$

A equação que une as propriedades térmicas e elétricas dos pontos de operação de cada canal do sistema para o seu respectivo fluxo radiante total resultante (Φ_x) é mostrada em 12:

$$\phi_x(I_x, T_{jx}) = n_x\phi_{0x}(d_{0x} + d_{1x}I_x)(c_{0x} + c_{1x}T_{jx}) \quad (12)$$

Na modelagem PET, ϕ_{0x} é o fluxo nominal informado pelo fabricante na corrente de teste I_{0x} e na temperatura de junção de teste T_{jx} . O fabricante também fornece outras duas curvas normalizadas essenciais para o comportamento fotoelétrico:

- O comportamento do fluxo normalizado em função da corrente direta do LED, com temperatura de junção constante $T_{jx} = T_{0x}$.
- O comportamento do fluxo normalizado em função da temperatura de junção, com corrente direta constante $I_x = I_{0x}$.

Ambas as curvas são lineares. d_{0x} e c_{0x} são coeficientes lineares do primeiro gráfico do fluxo pela corrente ($\phi_x \times I_x$) e do segundo gráfico do fluxo pela temperatura ($\phi_x \times T_{jx}$), respectivamente. Enquanto que d_{1x} e c_{1x} são seus respectivos coeficientes angulares. Como se sabe que d_{0x} é próximo de zero, pois a partir do momento que tem corrente tem fluxo, e que d_{1x} é um coeficiente positivo enquanto c_{1x} é um coeficiente negativo, portanto pela equação 12 já se pode afirmar que o fluxo aumenta com a corrente e diminui com a temperatura. E pela equação (x), se $I_x = I_{0x}$ e $T_{jx} = T_{0x}$, o fluxo será $\phi_x = n_x \phi_{0x}$ para cada um dos canais.

As descrições dadas sobre as equações 11 e 12 leva a se projetar um estimador de fluxo simples para cada um dos canais. Se a tensão no terminal e a corrente dos canais vermelho e azul, V_R , V_B , I_R , I_B são medidos, então, sabendo todos os parâmetros que aparecem nas equações 11 e 12. Estes parâmetros são ϕ_{0x} , T_{0x} , V_{0x} , r_{0x} , k_{vx} , c_{0x} , c_{1x} , d_{0x} , d_{1x} , para cada um dos dois LEDs. E com a quantidade de LEDs em cada matriz n_R e n_B , a temperatura de junção em cada LED T_{jx} pode ser estimada a partir da equação 11 e, então, a equação 12 pode ser aplicada para calcular o fluxo radiante total de cada canal, sem qualquer conhecimento dos parâmetros do circuito térmico e sem recorrer à temperatura medidas. Assim, o estimador de fluxo consiste de um estimador de temperatura de junção T_{jx} mais um cálculo de fluxo, pela equação 12.

A Figura 30 mostra quatro gráficos que correspondem as quatro principais curvas características de ambos os modelos de LED utilizados no arranjo. Os gráficos foram traçados a partir das curvas fornecidas pelo *datasheet* através da digitalização de seus pontos (duas curvas em cada gráfico). Para extrapolar as curvas e obter as constantes do modelo de PET, o método dos mínimos quadrados foi adotado, encontrando os parâmetros V_{OR} , V_{OB} , r_{OR} e r_{OB} da figura 30 (a) da interação elétrica, d_{OR} , d_{1R} , d_{OB} , d_{1B} de figura 30 (b) – que é a interação fotoelétrica; c_{OR} , c_{1R} , c_{OB} , c_{1B} da figura 30 (c) – que é a interação foto-térmica; e finalmente k_{vR} e k_{vB} da figura 30 (d) – que é a interação eletrotérmica. Deve-se ressaltar que o comportamento a temperaturas inferiores a 25°C não foram considerado nas extrapolações feitas devido a valores de temperatura de junção menores que 25°C teoricamente não serem

factíveis para os sistemas em estufas. Os resultados para estes parâmetros se encontram na Tabela 2.

Parameter	Red LED	Blue LED
V_{0x}	1.792 V	2.715 V
r_{0x}	0.855 Ω	0.352 Ω
d_{0x}	0.062	0.249
d_{Ix}	2.623 A ⁻¹	2.072 A ⁻¹
c_{0x}	1.068	1.03
c_{Ix}	$-1.834 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	$-0.899 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
k_{vx}	$-1.347 \times 10^{-3} \text{ V }^\circ\text{C}^{-1}$	$-1.441 \times 10^{-3} \text{ V }^\circ\text{C}^{-1}$

Tabela 2: Parametros encontrados para LEDs azuis e vermelhos

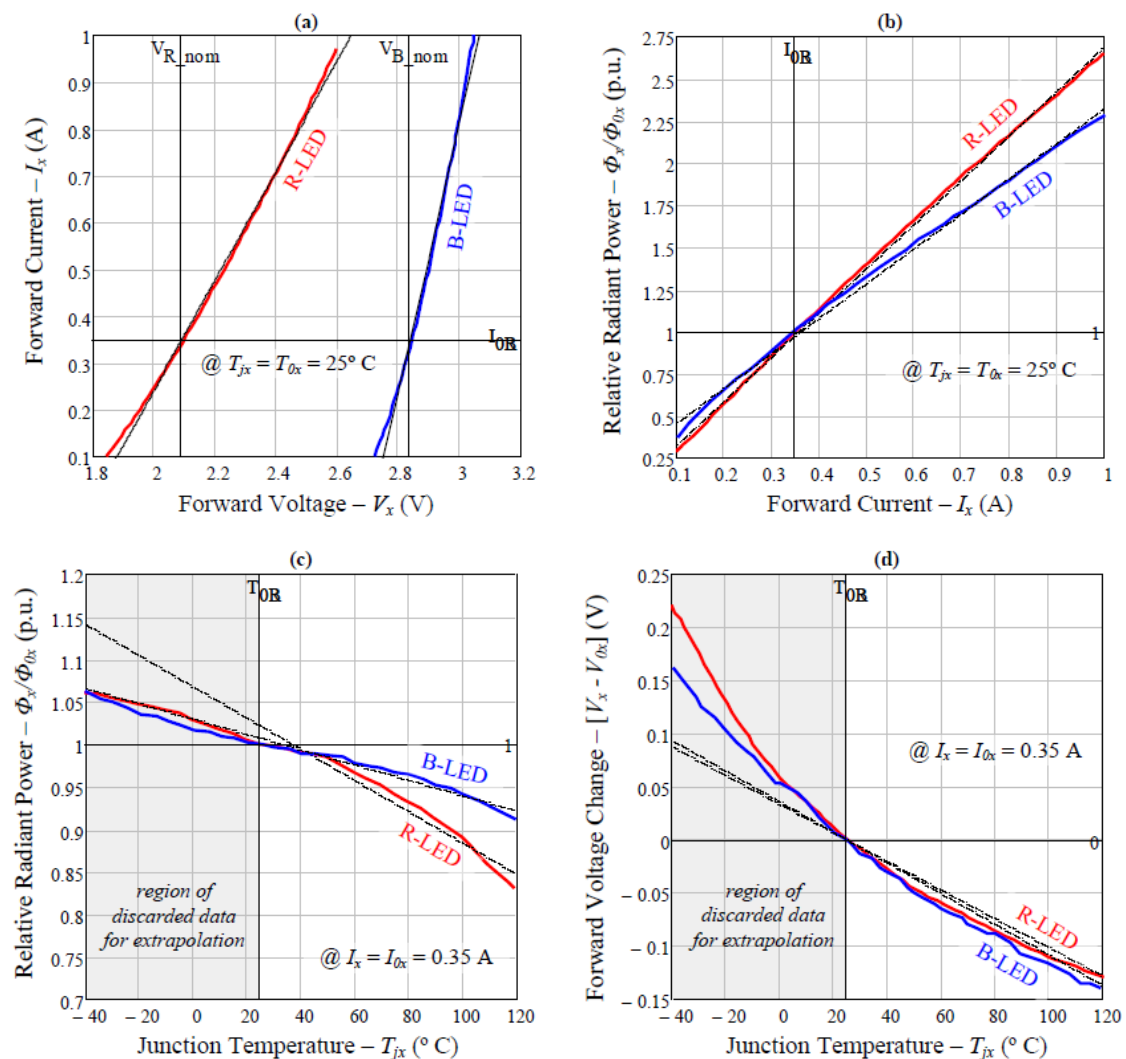


Figura 30 : Curvas características de ambos os LEDs além de suas extrapolações lineares: (a) corrente versus tensão, (b) normalizada fluxo radiante versus corrente, (c) fluxo radiante normalizado versus

temperatura de junção e (d) alteração na tensão versus mudança de temperatura. As quatro curvas extrapoladas para cada um dos LEDs (oito no total) são as linhas pretas sólidas sobrepostas às curvas originais (coloridas). (TAVARES, 2017)

6. SISTEMA EXPERIMENTAL DE MEDIÇÃO PARA AVALIAÇÃO DO ARRANJO DA LUMINÁRIA

Conforme já abordado, no capítulo 2, as medições de radiação PPFD e irradiância são de grande importância para os estudos em fisiologia vegetal e cultivos assistidos por luz artificial. No intuito de se obter dados experimentais da luminária LED produzida e da lâmpada de vapor de sódio foram realizados alguns ensaios para a medição de irradiância, PPFD e fluxo radiante do arranjo das luminárias de LEDs, a lâmpada de vapor de sódio e a lâmpada fluorescente. Isto se faz necessário para traçar o perfil de cada lâmpada de acordo com o requerido pelas necessidades fisiológicas de iluminação da planta. Como o nível de PPFD é retirado diretamente da folha da planta, se utilizou níveis de PPFD apontados em experimento de literatura entre $180\text{-}300 \mu\text{mol. s}^{-1}\text{m}^{-2}$. (SCHUERGER, 1997) (YORIO, N., 2001). (PHILIPS, 2015). Os testes foram feitos para níveis de potência diferente (para o tipo fluorescente e HPV) e para vários níveis de corrente na luminária LED.

6.1 ENSAIO COM O BLOCO

6.1.1 ENSAIO COM DIFUSOR COSSENOIDAL

Para o projeto adequado da luminária, utilizou-se o sistema de medição contendo os seguintes equipamentos, o espectroradiômetro Labsphere CDS610 (Labsphere, 2014), devidamente calibrado, cujo range de calibração é 350 a 1000 nm, em associação com o SpectraSuite da Ocean Optics. Além disso, um cabo de fibra ótica se fez necessário, para o envio de dados provenientes do sensor difusor cossenoidal CC-3-UV-S (200-2500 nm) para a Labsphere. Posteriormente, os dados a serem avaliados de cada luminária são analisados, tanto quantitativamente, quanto qualitativamente, através do computador, sendo então tratados e processados. O esquemático do sistema completo de medição está apresentado na Figura 31 e a Figura 32 mostra o esquemático experimental para o ensaio relatado. O arranjo do experimento foi composto de um braço regulável improvisado com condutores rígidos e uma superfície demarcada com pontos específicos de posicionamento do difusor e consequente medição de PPFD e irradiância.

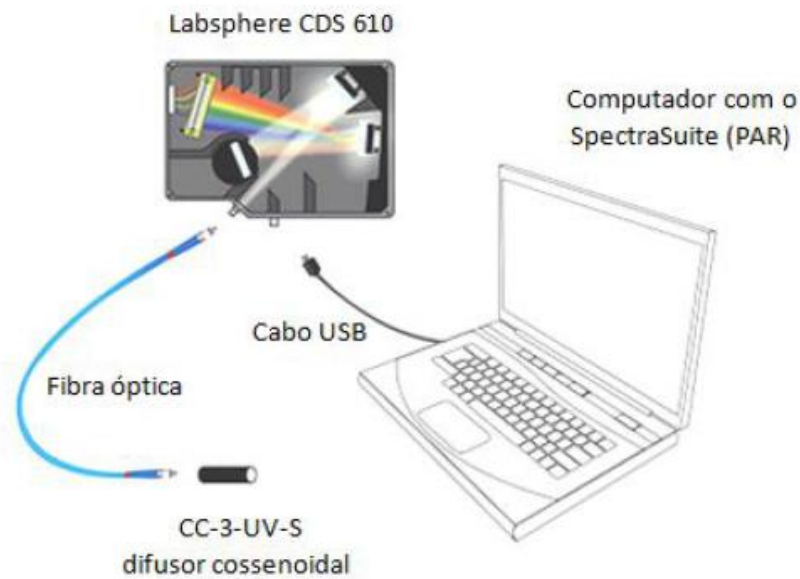


Figura 31: Equipamentos necessários para medições PPFd (ALMEIDA, 2014).

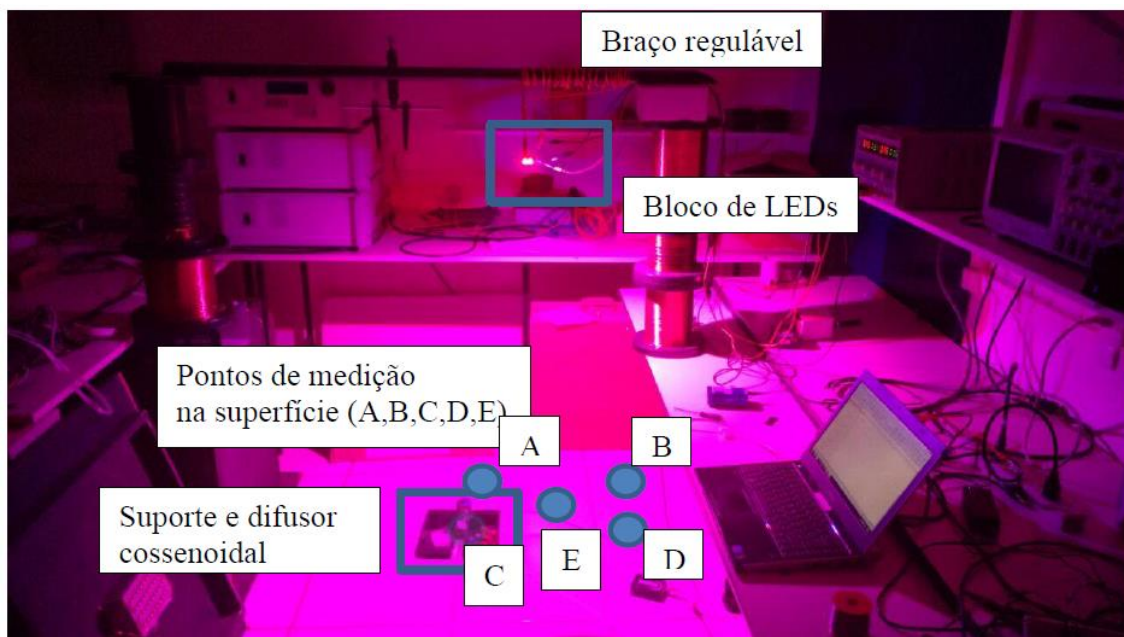


Figura 32: Arranjo experimental montado em laboratório para testes com difusor cossenoidal

Foi feita a medição em duas distancias, de 50 cm e 100 cm da planta, para a partir desses dados escolher a melhor distancia. As medições foram feitas em cinco pontos diferentes (cada ponto externo de um quadrado e um ponto ao centro, no qual este em todas as medições obteve-se o maior valor), para saber o valor do PPFd em cada parte da planta, representado na figura 33. O PPFd médio representa o valor médio desses cinco pontos medidos.

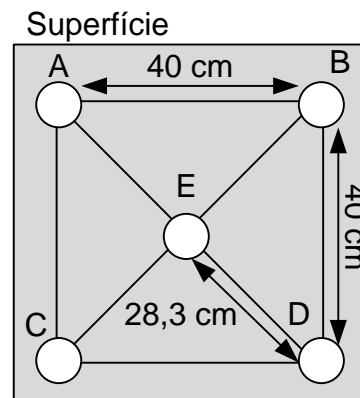


Figura 33: Disposição de pontos de medição do ensaio com difusor cossenoidal.

O arranjo do bloco constitui de quatro LEDs, três vermelhos e um azul, em dois canais diferentes, vermelho e azul. Este arranjo foi denominado “bloco” e o arranjo de seis blocos constitui uma luminária do arranjo proposto inicialmente para o projeto. Na figura 34, se encontra a prototipação do bloco de LEDs anexado a um dissipador com resistência térmica conhecida para atender a dissipação de calor gerada pelo bloco durante sua operação nos ensaios.

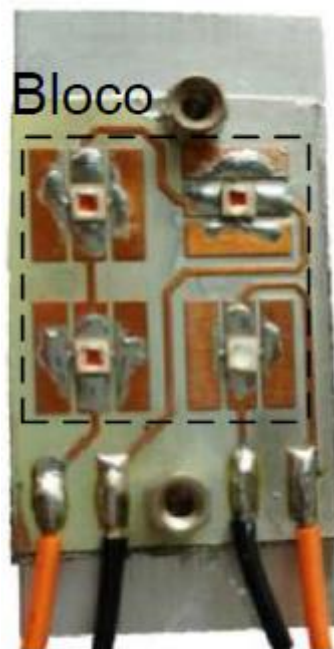


Figura 34: Protótipo do arranjo do bloco de LED

Os dados coletados para cada ponto medido se encontram na Tabela 3, abaixo:

Corrente (mA)	Altura (cm)	Irradiancia (W/m ²)	PPFD ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	Cromaticidade		Ponto
				x	y	
350	50	2	9,8	0,4887	0,1886	A
		2,265	10,175	0,4803	0,1828	B
		2,305	10,35	0,4781	0,1818	C
		2,32	10,4	0,467	0,1773	D
		3,08	14,06	0,4648	0,1737	E
	100	0,96	3,72	0,4666	0,1944	A
		0,96	3,75	0,4707	0,1984	B
		0,953	3,65	0,4568	0,1893	C
		0,939	3,55	0,4558	0,1884	D
		0,995	3,87	0,456	0,1886	E
500	50	2,92	13,49	0,4803	0,1825	A
		3,26	15,165	0,4758	0,1792	B
		3,33	15,47	0,4746	0,1786	C
		3,07	14,1	0,4627	0,1739	D
		4,25	19,85	0,4582	0,1703	E
	100	1,2	4,86	0,4681	0,1898	A
		1,222	5	0,4689	0,191	B
		1,236	5,04	0,456	0,1848	C
		1,24	5,03	0,4566	0,185	D
		1,285	5,25	0,4553	0,1831	E
750	50	3,596	16,89	0,4628	0,176	A
		3,73	17,49	0,4571	0,173	B
		4,26	20,08	0,4549	0,1712	C
		4,22	19,77	0,4459	0,1671	D
		5,52	26,13	0,4392	0,1629	E
	100	1,48	6,48	0,4468	0,1775	A
		1,51	6,59	0,4489	0,1792	B
		1,59	6,9	0,4391	0,1738	C
		1,56	6,74	0,4383	0,1756	D
		1,59	7,17	0,4396	0,1691	E

Tabela 3: Dados de irradiância, PPFD e cromaticidade coletados do experimento com difusor cossenoidal. (TAVAREZ, 2017)

Para melhor visualização foi feito o gráfico, apresentado na figura 35, com os dados da Tabela 3. Este mostra os dados do PPFD médio, a media das PPFD para os cinco pontos, dos seis experimentos realizados proveniente da iteração de alturas 100 cm e 50 cm e as correntes 350, 500 e 750 mA . Por este gráfico é possível perceber que os valores da PPFD são bem maior para a altura de 50 cm do que para a altura de 100 cm. Isto confirma uma maior influência no nível de PPFD pela variação da distância do que pela variação de corrente e isto se deve ao fato da PPFD variar com o quadrado da distância de acordo com o equacionamento radiométrico.

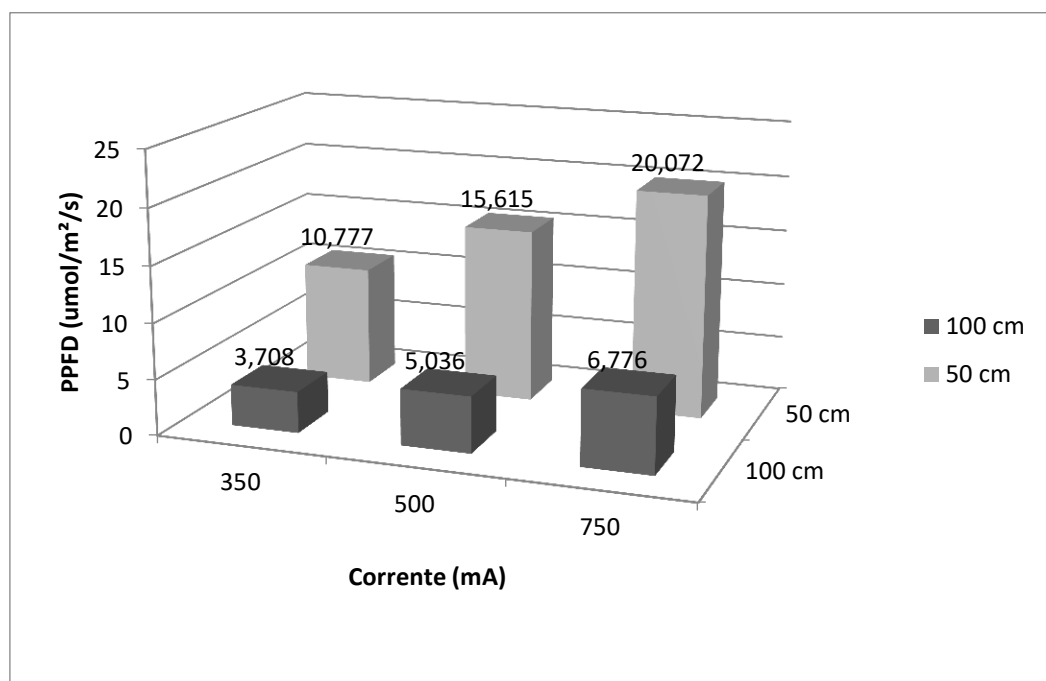


Figura 35: PPFD médio para os ensaios realizados de variação de corrente e altura. (TAVAREZ, 2017)

A Figura 36 mostra a homogeneidade de espectro ao longo dos testes para três níveis de corrente e dois níveis de altura, no qual a Figura 32a representa apenas o desvio cromático para o ponto central da superfície (ponto E) na altura de 100 cm de distancia da fonte luminosa e superfície iluminada. Enquanto na Figura 32b, também representa apenas o ponto central “e” para altura de 50 cm.

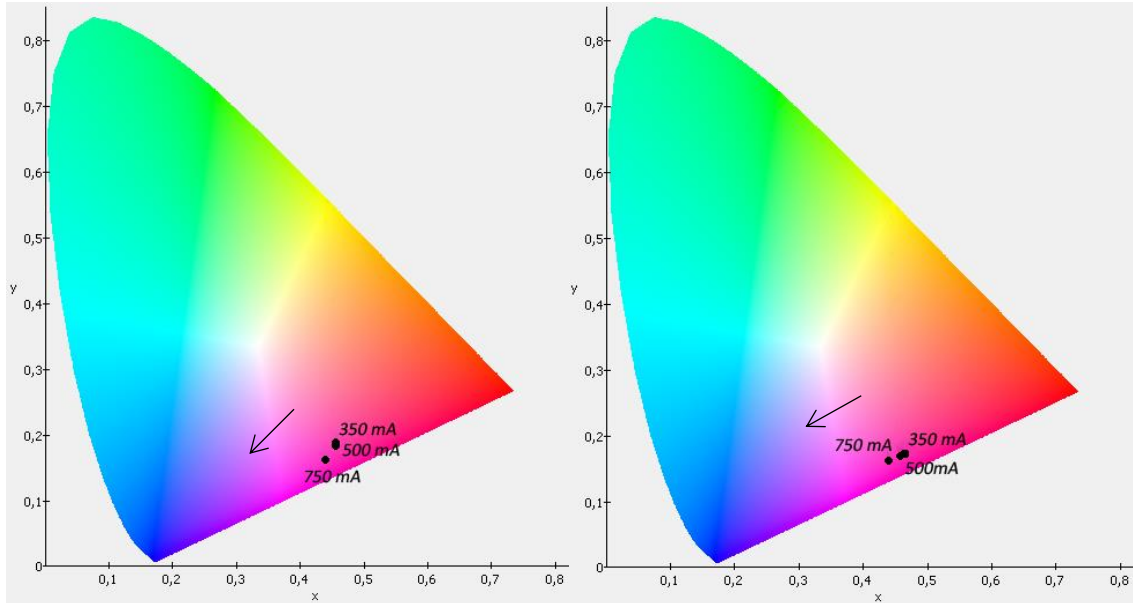


Figura 36: Desvio cromático para ensaio a 100 cm de altura (a) e desvio cromático para ensaio a 50 cm de altura (b). (TAVAREZ, 2017)

Supondo que o fluxo PFF seja proporcional a seis vezes o fluxo gerado por um bloco segundo seu arranjo, pode-se afirmar que a PFFD para a luminária atingirá um valor máximo de $166,8 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ para a distância de 50 cm entre fonte luminosa e superfície e com 1A de corrente. Este valor é abaixo ao mínimo recomendado para cultivo de plantas perenes, que é de $200\text{-}240 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ (PHILIPS, 2015) além da maioria dos estudos operam na faixa de $300\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, sendo este o valor almejado.

Apesar de ser possível aumentar a corrente da luminária, ou até mesmo, diminuir a distância entre a luminária e a planta para aumentar o valor da PFFD, optou-se por criar um novo arranjo com maior quantidade de LEDs vermelhos e azuis, para que o módulo tenha maior flexibilização no controle do espectro e da distância.

6.1.2 ENSAIO COM ESFERA INTEGRADORA

Outro método de medição foi realizado com a luminária para obter seu fluxo radiante, utilizando-se a esfera a partir do seguinte esquemático apresentado na figura 37. Para tanto, foi empregada uma fonte de tensão contínua e um osciloscópio para analisar as tensões e correntes. Durante o experimento, o arranjo do bloco de LED ficou dentro da esfera e, através do cabo de fibra ótica e de um espectrômetro foi possível obter dados diretamente no computador.

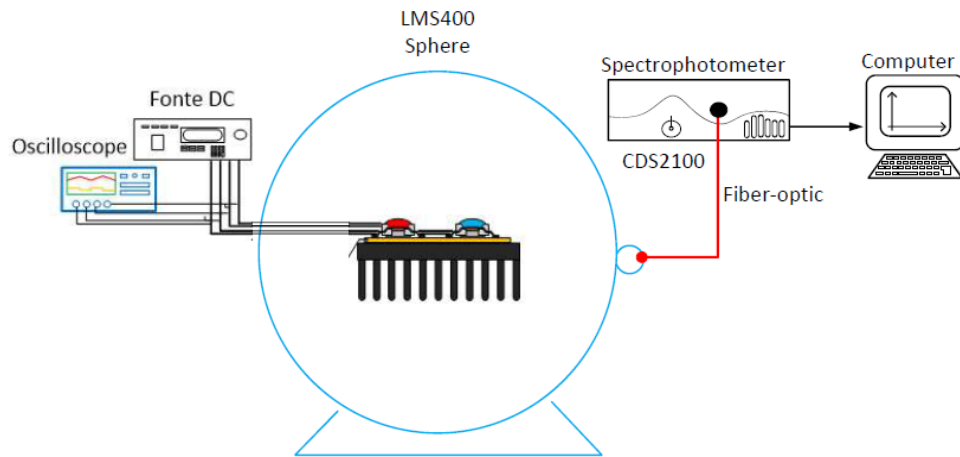


Figura 37: Arranjo experimental com esfera integradora (TAVAREZ, 2017)

Do arranjo experimental da figura acima foi obtido o fluxo radiométrico totalizado do bloco, apresentado na Figura 38, para uma dimerização com corrente igual para cada canal de 250, 350, 500 e 750 mA. Também consta na figura a porcentagem de fluxo que cada canal contribui para o total emanado pelo bloco e pode-se observar que a proporção de vermelho para azul é praticamente constante.

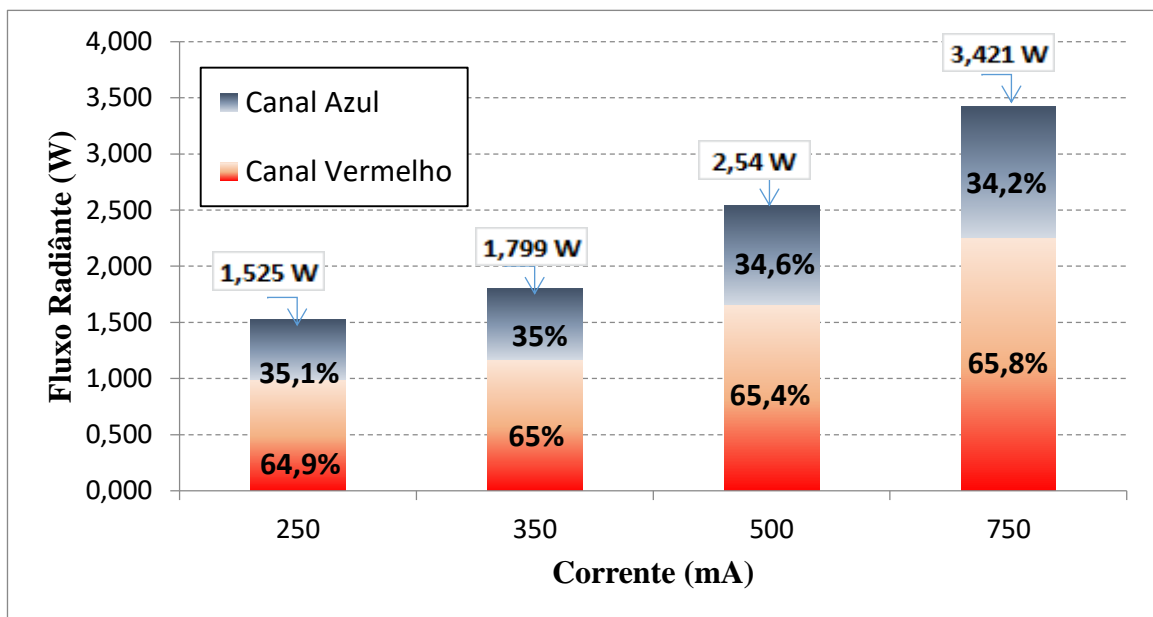


Figura 38: Parâmetros elétricos e radiométricos medidos na esfera. (TAVAREZ, 2017)

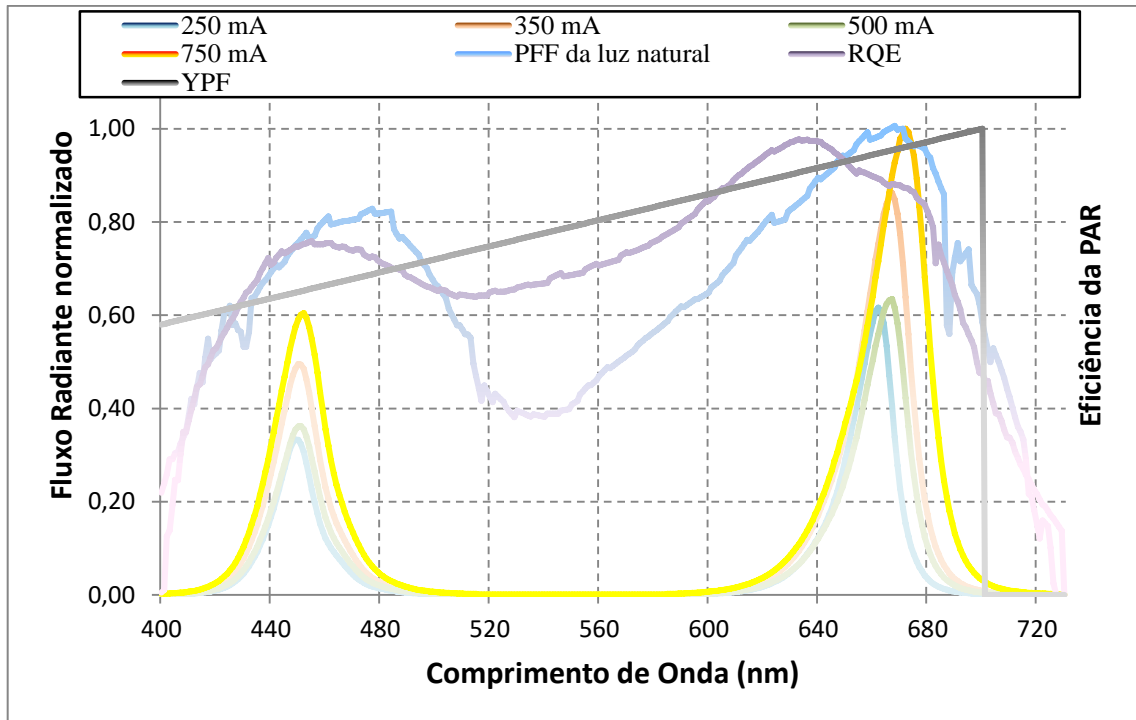


Figura 39: Resultado de distribuição espectral para discretização em 250, 350, 500 e 750 mA em comparação com fluxo radiante solar e eficiência da PAR

A Figura 39 mostra a distribuição espectral do arranjo sobre a curva de radiação fotossintética ativa das plantas. Pode-se observar pela que os picos dos modelos de LED condizem com as regiões de maior eficiência da curva de YPF. É possível observar um acentuado desvio cromático do vermelho, que não era premeditado no projeto, porém o mesmo não compromete severamente no produto de PPF ou YPF do bloco, pois se mantem dentro do comprimento de onda aceitável.

A tabela 4 apresenta os valores de fluxo radiante medido no bloco pela esfera integradora e o fluxo estimado pelo modelo PET, apresentado anteriormente no capítulo anterior. Realizando uma comparação entre eles percebe-se que os dois valores para a mesma corrente estão muito próximos e, portanto o erro é muito baixo, sendo 3,22% para o fluxo radiante azul, 3,74% para o fluxo radiante vermelho e 3,48% para o fluxo radiante total.

Corrente (mA)	Fluxo Medido do Azul (W)	Fluxo Estimado do Azul (W)	Fluxo Medido do Vermelho (W)	Fluxo Estimado do Vermelho (W)	Fluxo Medido Total (W)	Fluxo Estimado Total (W)
250	0,5353	0,4956	0,9897	0,9269	1,525	1,4225
350	0,6296	0,6213	1,1694	1,1483	1,799	1,7696
500	0,8788	0,8465	1,6612	1,6342	2,54	2,480
750	1,1700	1,1643	2,2510	2,3686	3,421	3,5329
Erro (%)		3,2204		3,7469		3,4875

Tabela 4: Dados medidos e estimados do fluxo azul, vermelho e total do bloco de LED

Com os dados acima foi feito o seguinte gráfico, representado na figura 40, em que é possível ver melhor a proximidade dos valores medidos e estimados. Assim esse ensaio valida o modelo PET proposto anteriormente.

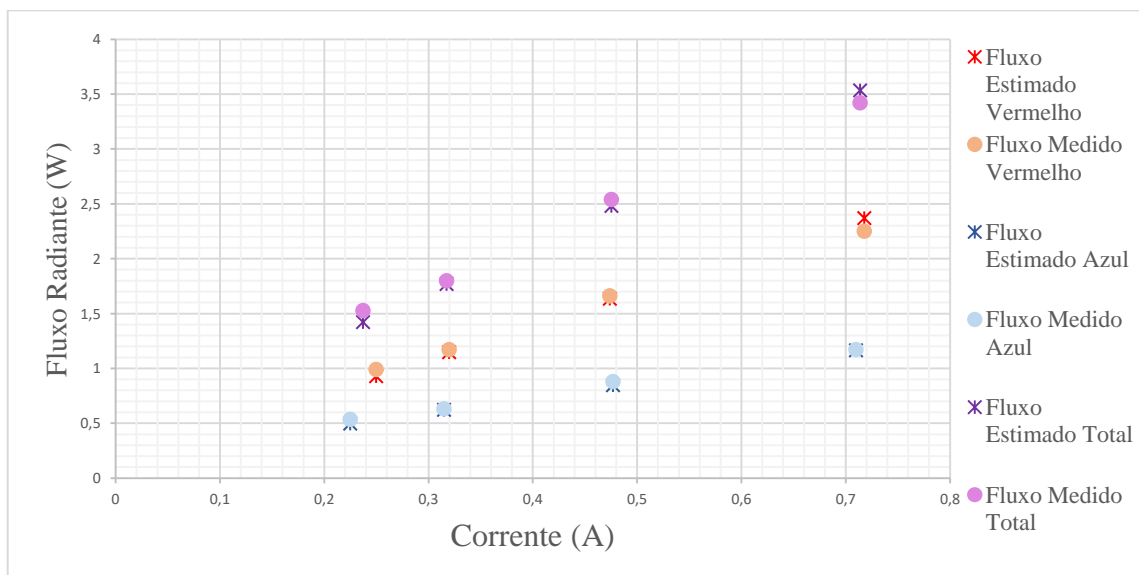


Figura 40: Gráfico dos fluxos medidos e estimados em função da corrente. (TAVAREZ, 2017)

6.2 ENSAIO PARA LÂMPADA DE VAPOR DE SÓDIO

O ensaio com o difusor cossenoidal foi realizado para uma lâmpada de vapor de sódio, com o objetivo de utilizar a mesma com determinada potência para que o PPFd chegasse o mais próximo possível do valor encontrado no arranjo da luminária LED, com o intuito de uma comparação justa de crescimento e desenvolvimento do lúpulo por dois tipos de

lâmpadas diferentes. A lâmpada de vapor de sódio foi instalada em um refletor de rua (conforme figura 36). Isso porque, é de extrema importância um refletor para este tipo de lâmpada, pois ela irradia isotopicamente, além de que quando se utiliza um refletor fixo e padrão os dados obtidos experimentalmente tem mais consistência.

A lâmpada escolhida para ser utilizada foi uma lâmpada de vapor de sódio de 150 W, ela obteve um valor médio de PPFD de $142,478 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ a uma distancia de 50 cm da planta e reator de 150 W de 220 V. A figura 41 mostra o espectro característico obtido no ensaio da lâmpada de vapor de sódio de 150 W, utilizando o refletor de rua, e ainda, a região de desvio cromático desta lâmpada.



Figura 41: Luminária publica utilizada como refletor utilizado para lâmpada de vapor de sódio. (Fonte: <http://www.lumilandia.com.br/htm>)

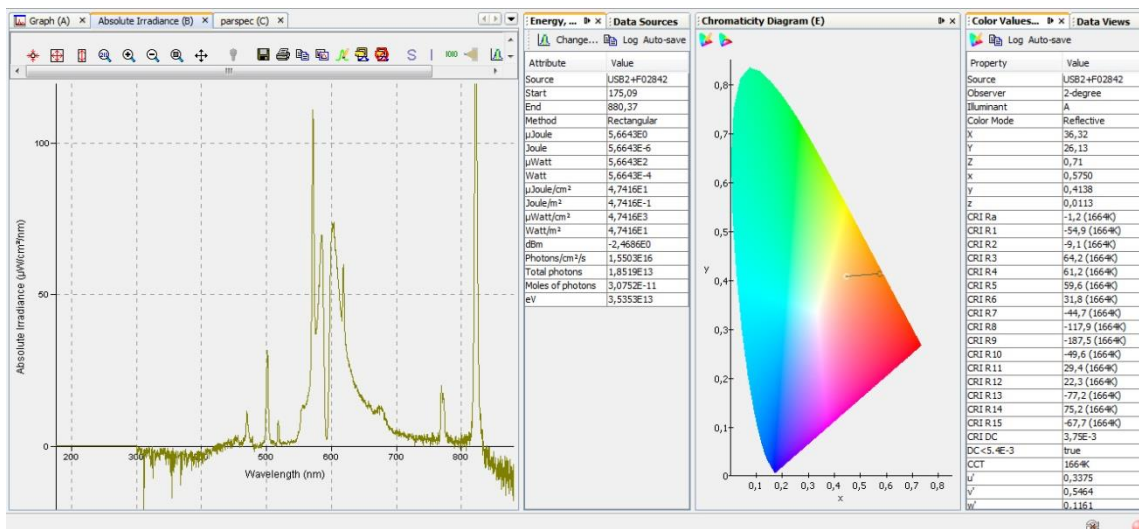


Figura 42: Espectro de energia da lâmpada de vapor de sódio de 150W com refletor de rua e desvio cromático.

6.3. ENSAIO PARA LÂMPADA FLUORESCENTE

O ensaio com difusor senoidal também foi realizado para uma lâmpada fluorescente, conferindo a viabilidade de sua utilização. Foi obtida uma PFFD média de $236,41 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, utilizando quatro lâmpadas fluorescentes de 85W, cada uma distanciada a 50cm da planta. Devido ao fato de essas lâmpadas ocuparem mais espaço físico e uma alta potência, além do fato que seria necessário dimensionar um refletor adequado para sua utilização, a lâmpada fluorescente se tornou inviável e portanto a comparação do projeto final será feita com lâmpadas de vapor de sódio.

6.4. ENSAIO PARA NOVA LUMINÁRIA LED

A nova luminária projetada utiliza os mesmos LEDs com seus respectivos espectros, porém será modificada a razão e a quantidade dos mesmos pretendendo assim aumentar o PFFD e obter mais liberdade de controle. O arranjo da luminária de dois canais é composto por uma matriz de 20 LEDs vermelhos e 8 LEDs azuis, apresentada na Figura 39. O canal R, que tem eficiência radiante de $\eta_R = 56\%$, totaliza o máximo de energia elétrica de 65 W e 36 W de potência radiante, enquanto o canal B totaliza uma potência elétrica máxima de 34 W e 24 W de potência radiante, pois sua eficiência radiante é $\eta_B = 69\%$. Este novo arranjo corresponde aproximadamente a uma proporção de 1,5: 1 no fluxo radiante ($\Phi_R: \Phi_B$) quando ambos os canais são conduzidos sob potência máxima (99 W no total) e a proporção no número real de LEDs é 2,5: 1 ($n_R: n_B$).

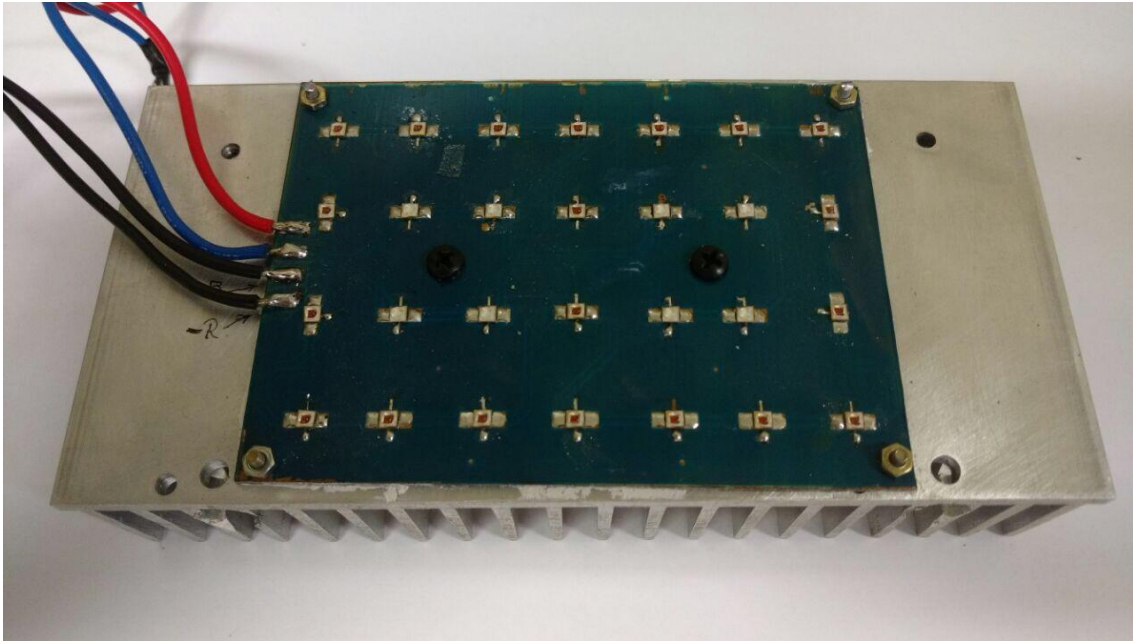


Figura 43: Protótipo da nova luminar LED com 20 LEDs vermelhos e 8 LEDs azuis.

Realizando a mesma metodologia representada acima com o bloco de LED se obteve o valor do PPFD e do fluxo para a nova luminária de LED.

6.4.1 ENSAIO COM DIFUSOR COSSENOIDAL

Foi realizado o ensaio com o difusor cossenoidal para a nova luminária LED e resolveu-se por medir o PPFD apenas no ponto “e”, assim sabe-se que o valor obtido na medição de PPFD e irradiância é o máximo possível para a planta e aos pontos ao seu redor. Foi variada a corrente de 100 mA até 1000 mA e a distância do difusor foi de 50 cm da planta para todas as medições, os dados coletados se encontram na Tabela 5, abaixo:

Corrente (mA)	Irradiância (W/m ²)	PPFD ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	Cromaticidade		Temperatura da case (°C)	Temperatura ambiente (°C)
			x	y		
Sem ventilação Forçada						
100	2,29	21,9	0,275	0,043	29	20,6
200	8,63	51,7	0,2625	0,0616	34,2	20,95
300	14,3	77,79	0,259	0,0673	38,3	21,8
350	16,9	90,1	0,2584	0,068	43,2	22,15
400	19,9	104,3	0,258	0,069	46,1	22,6
500	25,35	130,9	0,2515	0,0695	58,6	24,1
600	29,1	149,7	0,245	0,0673	65,8	25,3
700	32,9	167	0,235	0,065	73,8	26,4
800	35,1	176	0,227	0,0637	84,1	27,4
900	36,9	182,7	0,2211	0,0628	90	28,2
1000	38,75	189	0,2155	0,061	92,5	30,5
Com ventilação Forçada						
100	2,6	25,38	0,2644	0,0361	13,5	18,8
200	8,525	54,1	0,2689	0,06	13,8	18,8
300	14,45	82,75	0,2685	0,0649	15,4	18,9
350	17,1	96	0,269	0,0666	14,5	18,9
400	19,79	109,1	0,266	0,0667	15,7	19,0
500	25,55	137,4	0,2688	0,0691	16,1	19,0
600	30,28	161,1	0,266	0,0688	16,1	19,0
700	35,04	184,25	0,265	0,0695	16,6	19,1
800	39,93	206,9	0,2606	0,0692	18,3	19,1
900	43,66	225,5	0,2577	0,0685	18,7	19,2
1000	47,7	244,8	0,2548	0,066	19,5	19,2

Tabela 5: Dados de irradiância, PPFD e cromaticidade coletados do experimento com difusor cossenoidal.

Ao analisar a Tabela 5 é possível observar que para todos os dados medidos foi obtido um valor maior da PPFD, quando utilizada a ventilação forçada de dois coolers acoplados à placa, como mostra a figura 44. Conforme explicado anteriormente, a ventilação forçada é de grande importância para determinados sistemas pois permite atuar acima da corrente nominal do LED e evita danos, uma vez que a temperatura diminui rapidamente. A partir desses dados,

plotou-se o gráfico representado na figura 45, que compara o protótipo realizado com os valores da luminária.

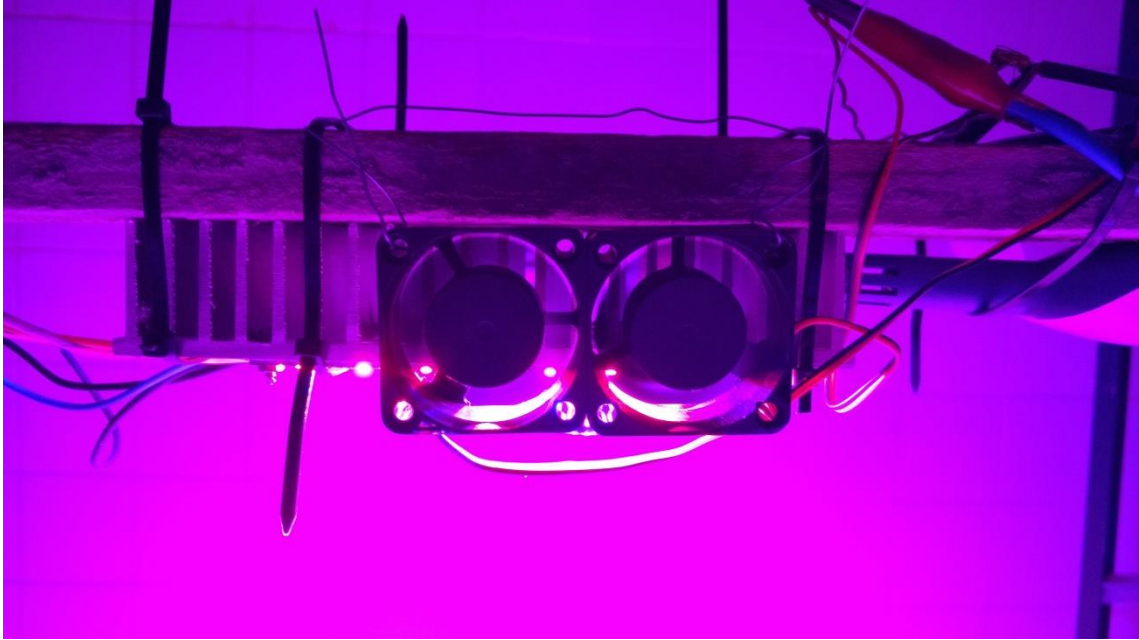


Figura 44: Dois coolers acoplados a luminária LED em seu ensaio de medição com difusor cossenoidal

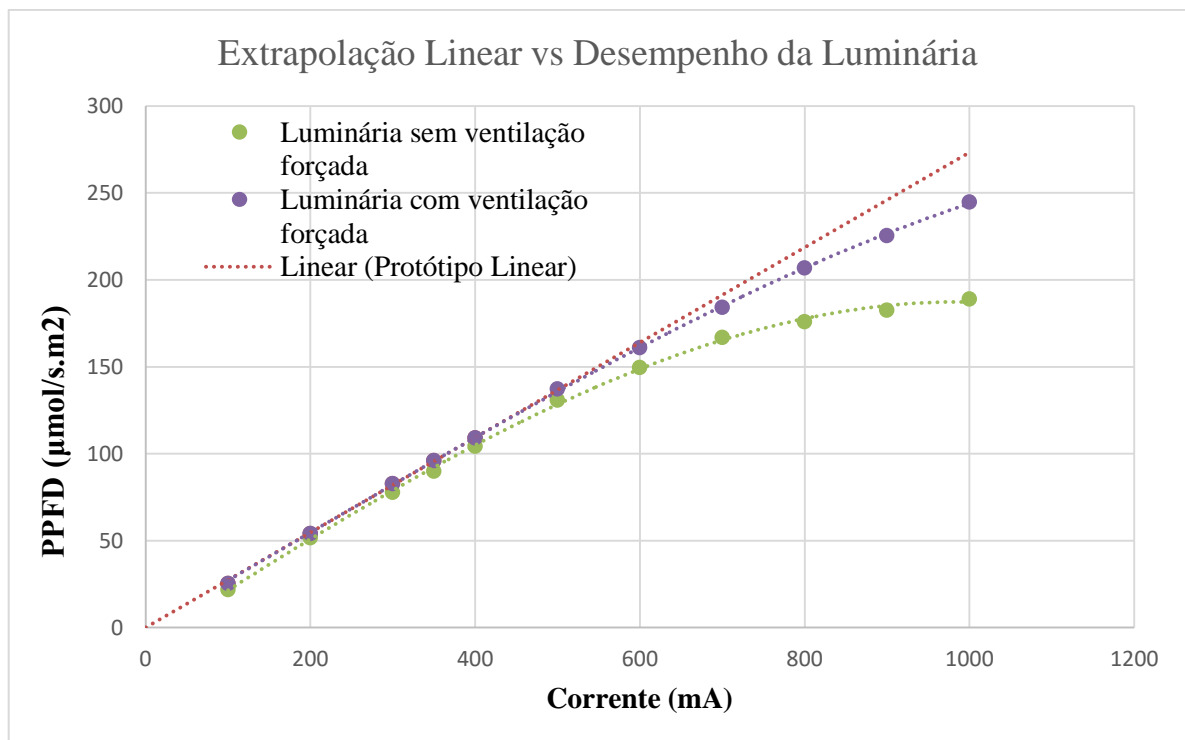


Figura 45: Gráfico dos dados da tabela 5, comparado com a extrapolção linear.

Por meio do gráfico, é possível perceber que a luminária com ventilação forçada se assemelha mais ao protótipo realizado, e portanto, será a luminária utilizada. Mediu-se ainda, a irradiância e PAR para alturas menores de 40 cm e 30 cm, no ponto “e”, os dados estão na Tabela 6.

Corrente (mA)	Altura (cm)	Irradiância (W/m²)	PPFD ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)
250	40	19,5	110,5
	30	34,07	182
500	40	35,25	187,2
	30	62,07	307
750	40	53,88	274
	30	82	396
1000	40	66,52	333,05
	30	93	450

Tabela 6: Dados de irradiância, PPFD e altura coletados do experimento com difusor cossenoidal.

6.4.2 ENSAIO COM ESFERA INTEGRADORA

Foi feito o ensaio da luminária de LEDs dentro da esfera integradora, com a mesma metodologia apresentada anteriormente para o bloco de LED. A figura 47, apresenta uma foto do ensaio da luminária dentro da esfera.



Figura 46: Ensaio da luminária nova dentro da esfera integradora.

A tabela 7 mostra o fluxo radiométrico total da luminária LED para uma dimerização com corrente igual em cada canal de 200, 400, 600, 800 e 1000 mA. Também consta na tabela o fluxo que cada canal contribui para o total emanado pela luminária. Foi obtido pela esfera o fluxo total e depois calculado a partir da relação da razão do fluxo vermelho pra azul, e assim obtido o fluxo do espectro de cor azul e vermelha.

Corrente (mA)	Fluxo Medido do Azul (Φ_b)	Fluxo Medido do Vermelho (Φ_r)	Fluxo Total (Φ)
Sem ventilação Forçada			
200mA	2,3234	3,5778	5,901153
400mA	4,6872	7,2180	11,90503
600mA	6,7275	10,3599	17,08709
800mA	7,9094	12,1799	20,08903
1000mA	8,4936	13,0794	21,57288
Com ventilação Forçada			
200mA	2,27	4,0749	6,37
400mA	4,33	7,8662	12,24
600mA	6,3	12,2000	18,57
800mA	7,936	15,3847	23,41
1000mA	9,3	18,0826	27,55

Tabela 7: Dados do fluxo azul, vermelho e total.

Portanto com base nos ensaios feitos a nova luminária LED a ser utilizada contém 20 LEDs vermelhos e 8 LEDs azuis, ela será utilizada com ventilação forçada e corrente de 500 mA, a uma altura de 30 cm do topo da planta e seu PPFD é de $307 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, que é o valor mais utilizados em estudos anteriores nesta área. Além disso, o fluxo radiante total é de aproximadamente 15,4 W. Com estes valores pretende-se atender todas as necessidades luminosas de uma planta adulta de lúpulo.

7. DRIVER

O *driver* para LEDs é um dispositivo elétrico que regula a energia de um LED ou um *array* de LEDs, este, responsável por responder às mudanças das necessidades do circuito LED, fornecendo uma quantidade constante de energia para o LED. Tudo isso ocorre porque as suas propriedades elétricas mudam em função da temperatura. O *driver* é uma fonte de alimentação autônoma que possui saídas compatíveis com as características elétricas dos LEDs. Eles podem oferecer dimerização por meio de circuitos de modulação de largura de pulso (do inglês, *pulse width modulation*) (PWM) e também, ter mais de um canal para controle separado por diferentes matrizes de LEDs. No entanto, é importante ressaltar que a utilização de um *driver* inapropriado pode fazer com que o LED fique muito quente e instável, causando um baixo desempenho e até mesmo, uma falha permanente. (ELECTRONICS, 2017)

Os *drivers* de corrente contínua são projetados para LEDs que requerem uma corrente de saída fixa e uma tensão de saída variada. Esse tipo de *driver* terá uma corrente de saída especificada e um intervalo de tensões que varia dependendo da potência do LED. Usar uma taxa de amplificador mais alta faz com que o LED emane mais brilho. No entanto, ele acabará por sobrecarregar o LED, o que resultará em redução da vida útil e falha prematura. Uma vez que os *drivers* de corrente contínua mantêm um brilho consistente, eles são frequentemente usados para avisos e displays comerciais. (1000BULBS, 2017).

Drivers com dimerização podem diminuir a saída de irradiância do LED em toda a gama de 100% a 0%, e para isso, a maioria destes *drivers* opera usando o método PWM. Com este método, a frequência pode variar de uma centena de modulações por segundo para centenas de milhares de modulações por segundo, de modo que o LED pareça estar continuamente aceso sem *flicker*. Um benefício do método PWM é que ele permite a dimerização com um deslocamento de cor mínimo na saída do LED.

De acordo com o *Lighting Research Center*, a dimerização faz com que os LEDs experimentem uma mudança na distribuição de energia espectral, como uma lâmpada incandescente. A dimerização não resulta em perda de eficiência pois, durante seu funcionamento, os LEDs se mantêm com a mesma tensão e corrente de quando durante a saída de luz total. Da mesma forma, sua vida útil não é afetada pela dimerização, como às vezes é o caso com iluminação fluorescente frequentemente esmaecida, inclusive, pode até ser prolongada uma vez que a dimerização pode reduzir as temperaturas de operação dentro da fonte de irradiação. (DiLouie, 2004).

O *driver* utilizado para acionar a luminária de LED foi baseado (ALMEIDA, 2010) no qual o trabalho propõe um reator de chave única não ressonante (do inglês, *single switch nonresonant*) (SSNR). O inversor não ressonante é caracterizado por alimentar a lâmpada com uma forma de onda de corrente não senoidal, devido à ausência do filtro ressonante de saída.

A ideia geral é de que os *drivers* do sistema de iluminação sejam alimentados diretamente em corrente contínua, por um retificador centralizado de alto fator de potência com o intuito de minimizar o custo do sistema de iluminação. A alimentação em corrente contínua elimina problemas relacionados à regulação de tensão na entrada dos reatores, aos efeitos do ripple na corrente da lâmpada (aumento do fator de crista) e elimina também a necessidade de um estágio de correção de fator de potência em cada unidade de reator.

O *driver* possui uma técnica de controle proposta para a limitação de corrente nos *arrays* dos LEDs. É usado um controle em modo de corrente, do tipo que cria um tempo fixo de abertura para a chave estática (*constant off-time control*). A técnica consiste em medir a corrente que percorre a chave estática do MOSFET (do inglês, *metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*), fazendo-a abrir quando esta atinge um pico máximo determinado, i_M . Após a comutação, mantém-se a chave aberta por um instante pré-determinado de tempo, t_o , e com base nestes dois parâmetros controláveis, corrente máxima na chave (i_M) e tempo desligado (t_o), tem-se o controle para o *driver*. A abertura e fechamento da chave é comandada pelo circuito de controle, quando a sua corrente atinge o pico pré-definido, i_M , abre a chave e quando o tempo de desligamento pré-definido, t_o , é completado, fecha-se a chave.

Para implementar o circuito de controle foi utilizado um par de comparadores, integrados em um único circuito monolítico, e neste caso foi utilizado o circuito integrado de baixíssimo custo LM393, que contém dois comparadores do tipo coletor aberto e suporta operação em alta frequência.

O circuito completo de controle pode ser visto na Figura 48.

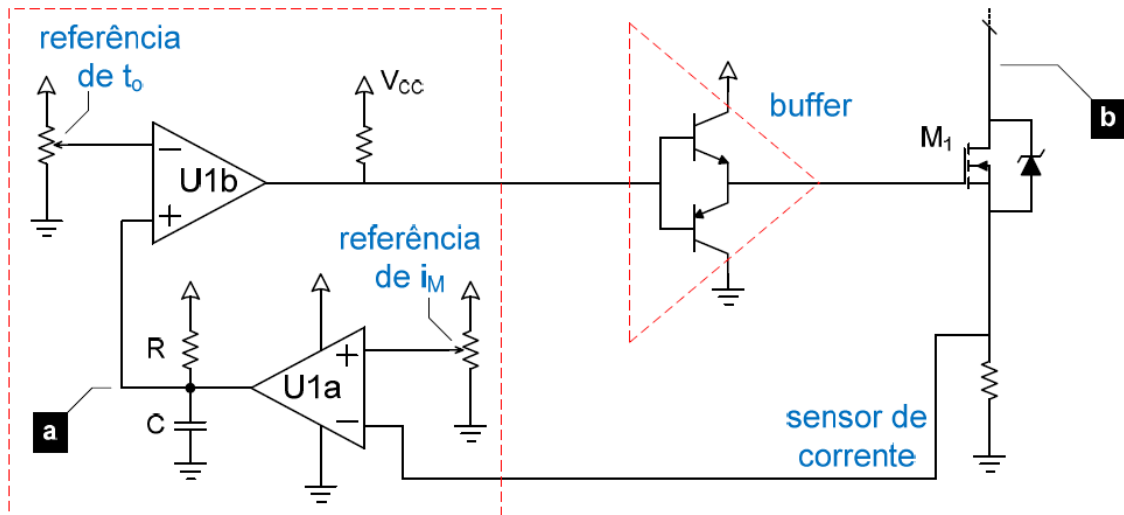


Figura 47 Circuito prático do controle do conversor. (ALMEIDA, 2014b)

Um resistor de baixo valor, tal qual 1Ω , é usado como sensor de corrente vindo do MOSFET na entrada inversora do comparador $U1_a$ com a referência i_M , de máximo pico de corrente, a qual foi selecionada uma corrente ajustável desejada, por um potenciômetro, esta é fornecida a entrada não inversora do comparador $U1_a$. Assim que o comparador dispara, o capacitor começa a carregar, e o resistor é referência para este, pela curva RC. No comparador $U1_b$ tem-se a tensão em RC na entrada não inversora, comparado com a referência de t_o , selecionada pelo outro potenciômetro, na entrada inversora, que aciona o MOSFET no momento em que o comparador dispara. As formas de onda mostradas na Figura 49 explicam o funcionamento do circuito de controle.

Foi utilizado um *buffer push-pull* para fazer a interface do controle com a chave. Ele possui dois transistores bipolares de sinal operando de forma complementar, comandando o MOSFET. Os transistores escolhidos foram os de alto ganho e baixa corrente BC548C NPN e seu complementar PNP BC558C.

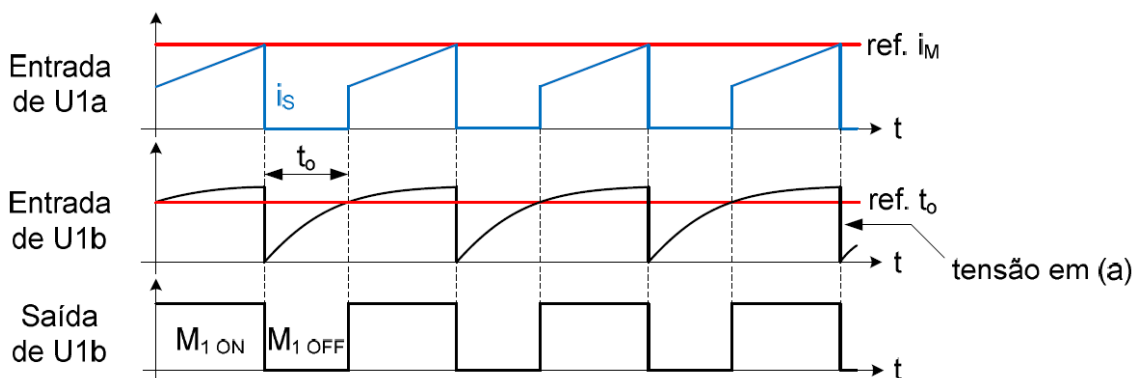


Figura 48: Formas de onda no circuito de controle. (ALMEIDA, 2014b)

A primeira forma de onda refere-se a entrada do comparador, $U1_a$, que compara o sensor de corrente, em azul, com a referência i_M , ajustada no potenciômetro, representado pela linha vermelha. O indutor assume uma rampa de incremento de energia se igualar ao valor da referência, o que abre a chave, pois a tensão de saída do segundo comparador é igual a tensão do resistor de pull up, fazendo a corrente igual a zero. Com a chave desligada a rede o circuito R-C na entrada de $U1_b$ e saída de $U1_a$, produz uma rampa de tensão no ponto (a) da Figura 54, que é utilizada para produzir o tempo de espera que mantém a chave aberta, t_o . A chave só torna a fechar novamente após o nível neste capacitor superar a referência para t_o , conforme figura 49. O circuito RC continua carregando depois que atinge a referência t_o , pois esta atuando em modo de condução contínua (CCM). A última forma de onda representa a saída do controlador U1b e é a forma de onda da chave do MOSFET.

7.1 SIMULAÇÃO DO DRIVER

Foi realizada a simulação do *driver* implementado no PSIM, representado nas figuras 50 e 51. Esse *driver* possui dois canais de controle independentes, um para o canal vermelho de LED e um para o canal azul, os dois são alimentados por uma mesma tensão de corrente contínua de 180V, e tem-se um V_{cc} de 15V para alimentar o CI. Ambos os comparadores são coletores abertos e é representado pela chave.

Além do sistema de controle já explicado acima, o *driver* também possui um buck com chave baixa, representado nas figuras 50 e 51, no canto esquerdo superior. O conversor buck (conversor abaixador) é um circuito eletrônico utilizado para converter uma tensão corrente contínua (CC) em outra tensão cc de valor mais baixo. Os valores dos componentes são quase iguais para os dois canais mudando apenas o resistor. Já no circuito RC, os valores de potenciômetro e o indutor e capacitor no *buck* de cada um.

O buffer representado acima foi substituído na simulação por uma fonte de CC de 15V, para acionar o MOSFET.

O *driver* foi simulado para acionar duas luminárias de LED ao mesmo tempo, como representado na figura x e x, onde apresenta o número de 40 LEDs, no caso do vermelho e sua resistência interna e tensão de limiar que são parâmetros calculados pelo modelo PET, visto anteriormente.

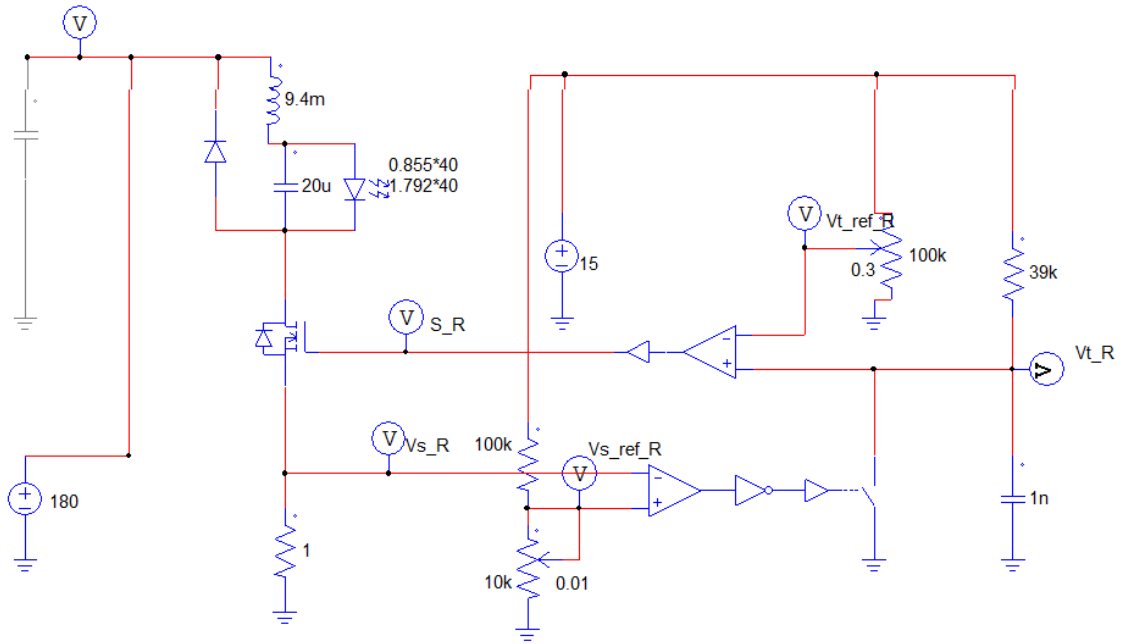


Figura 49: *Driver* para o canal vermelho na simulação do Psim.

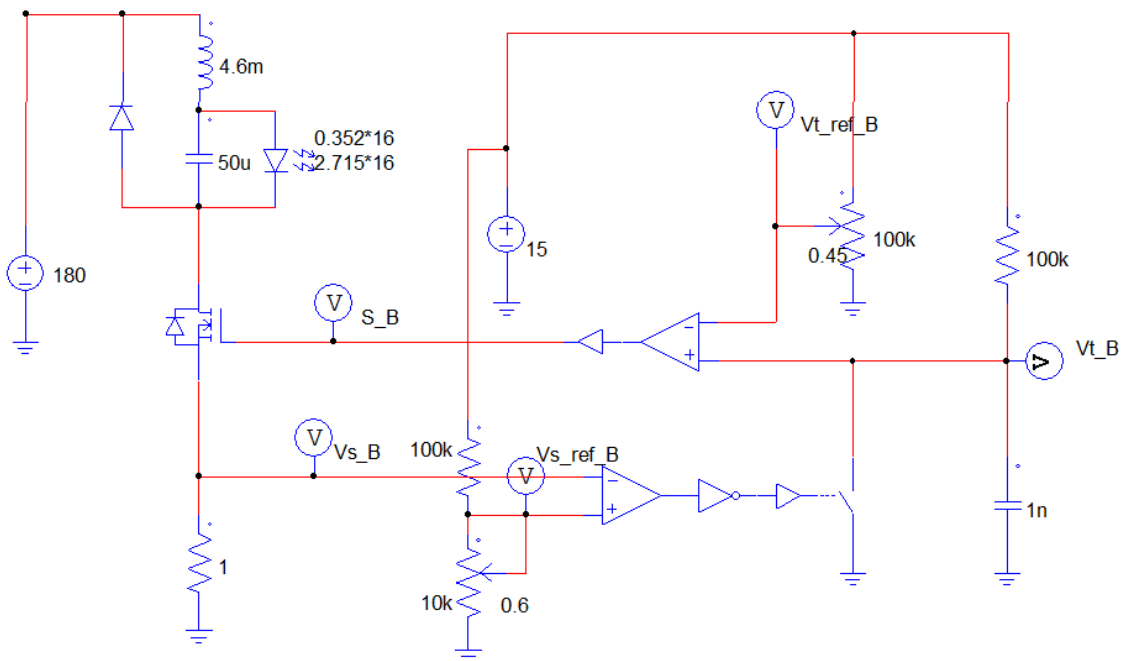


Figura 50: *Driver* para o canal azul na simulação do Psim.

O ajuste dos potenciômetros no circuito foi feito de modo experimental, tendo em vista que o indutor utilizado para fabricação do protótipo era pré-estabelecido, além disso, a frequência máxima do LM393, que possui os 4 comparadores utilizado para os dois núcleos de controle, é de 100kHz, portanto, evitou-se exceder essa frequência em toda a varredura de dimerização.

Assim, depois de alguns testes realizados, decidiu-se por utilizar a referência t_o constante e fazer a dimerização variando apenas o potenciômetro com referência i_M . O comparador $U1_b$, tem em sua saída a frequência de saída, pois o controlador é de frequência variável, e o comparador $U1_a$ refere-se à corrente média de saída, portanto tem-se uma dimerização feita pela apenas pela referência i_M , do canal vermelho e do canal azul.

Na dimerização aumenta-se e diminui a frequência de chaveamento, além do tempo de chaveamento de cada MOSFET, variando a frequência de pulsos no LED, obtendo-se assim o fluxo naquela corrente media.

A forma de ondas da simulação apresenta ondas iguais àquela explicada acima e a representada na figura 50, é a do canal vermelho. A tensão no circuito R-C atinge o máximo de 15,2V e a tensão do potenciômetro t_o está fixada em 10,5V. Já a corrente do MOSFET atinge até 1,35A que é o mesmo valor do potenciômetro i_M .

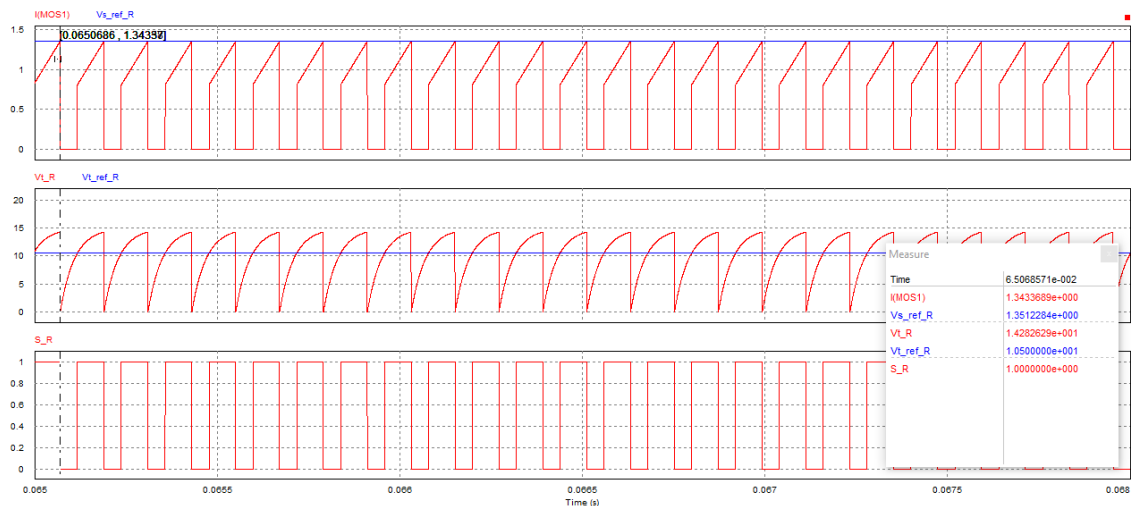


Figura 51: Formas de onda do *driver* para o canal vermelho.

Para o canal azul, as formas de ondas são similares com a realizada anteriormente, porém, agora, a chave se mantém pouco tempo fechada e mais tempo aberta. A tensão no circuito RC atinge o máximo de 9,43V e a tensão do potenciômetro t_o está fixada em 8,25V. Já a corrente do MOSFET atinge até 0,563A que é um pouco menor do valor do potenciômetro i_M , que é 0,576A.

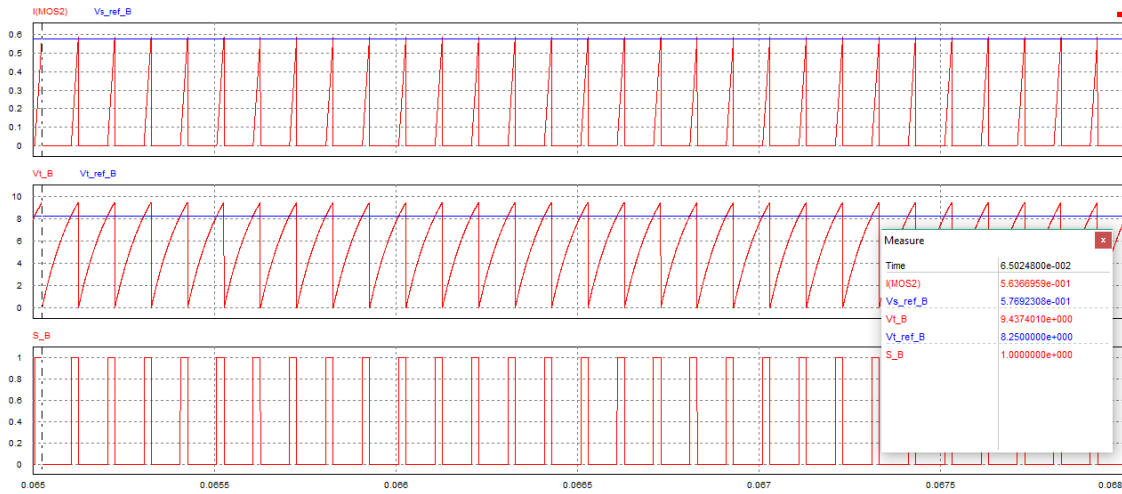


Figura 52: Formas de onda do *driver* para o canal azul.

Foi realizado o protótipo do *driver*, apresentado na figura 54. Nesta consegue-se ver os grandes indutores utilizados, que é uma das desvantagens do circuito de chave única, a necessidade de utilizar altos valores de indutância. Para o canal vermelho utilizou-se dois indutores pois este alimenta uma carga maior. Os potenciômetros em azul representa a referência t_0 e i_M , para cada canal e os dois MOSFETs estão do lado direito, um para cada canal.

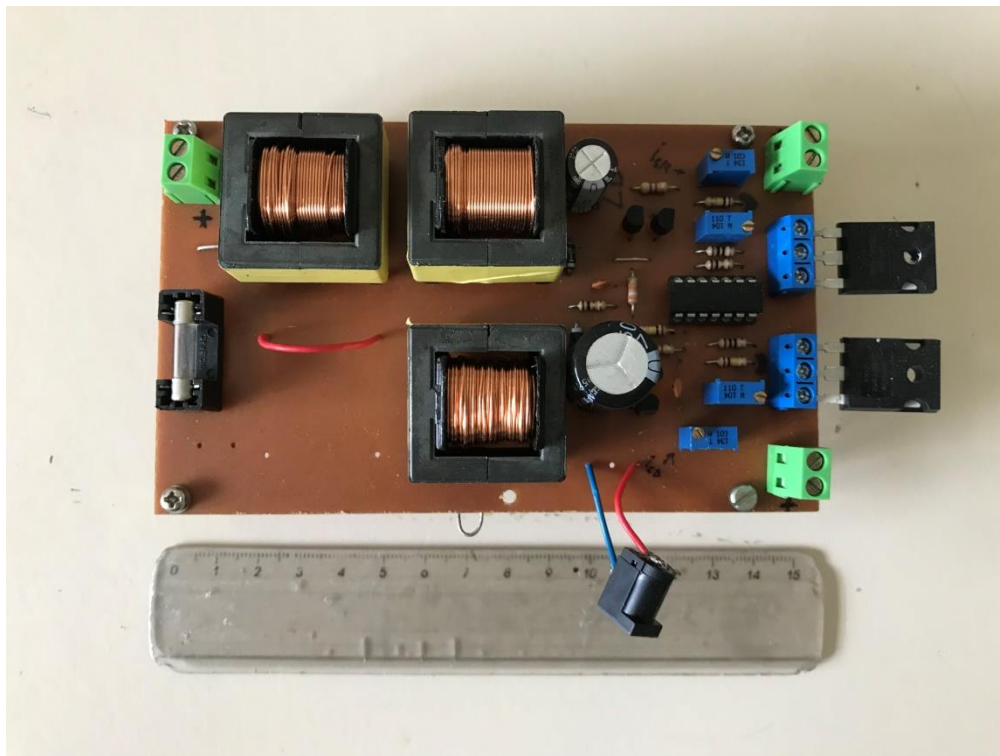


Figura 53: Protótipo do *driver* feito.

8 CONCLUSÃO

Foi apresentada, no decorrer dos capítulos, a relevância da tecnologia LED para a área de fisiologia vegetal, bem como uma revisão sobre a interação entre a luz e a fotossíntese das plantas superiores. Além disso, o uso de luminárias para a horticultura *indoor* e aspectos sobre as vantagens do uso de iluminação de estado sólido como fonte de radiação para o crescimento das plantas foram abordados e discutidos.

O projeto idealizado do protótipo da luminária foi realizado, explicitando todos os passos de escolha de espectro, razão e número de LEDs, e seu resultado experimental, por meio de um conjunto especializado de instrumentos radiométricos, o que coincidiu com o resultado simulado e validou as técnicas utilizadas.

Portanto, é possível concluir que para a luminária proposta e prototipada foi obtido um bom resultado para a PPFD, que referentes a estudos anteriores, atenderá as demandas necessárias para o crescimento do lúpulo. Além disso, o *driver* proposto e prototipado atende às necessidades da luminária em função de sua potência e, principalmente, ao realizar a dimerização, pois se tem uma grande liberdade de controle de fluxo radiante para a luminária LED enquanto o cultivo indoor está ocorrendo. Nesse sentido, são grandes as chances de se obter um resultado positivo com a comparação do crescimento e desenvolvimento das plantas de lúpulo em estufa.

Para trabalhos futuros recomenda-se o desenvolvimento dos seguintes procedimentos, de modo a complementar os resultados obtidos com o equipamento proposto:

- Comparar o crescimento e desenvolvimento das plantas de lúpulo com as luminárias escolhidas e ver qual mais se adequa para um cultivo em estufa.
- Buscar a cooperação com grupos de pesquisas em fisiologia vegetal, visando a avaliação do desempenho dos sistemas propostos.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1000Bulbs “LED Drivers” Disponível: <https://www.1000bulbs.com/category/led-drivers/> 2017

ALMEIDA P. S., “Síntese de Conversores Ressonantes com Alto Fator de Potência e Alta Eficiência para o Acionamento de Diodos Emissores de Luz”, Tese de doutorado, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2014b.

ALMEIDA P. S., “Reatores Eletrônicos Baseados numa Topologia de Inversor Não Ressonante de Chave Única: Aplicação em Iluminação Fluorescente Tubular” Monografia, UFJF, 2010

ALMEIDA, C. C. et al. Led-based electronic system to support plant physiology experiments. In: Industrial Electronics (ISIE), IEEE 23rd International Symposium on. 2014. p. 531-536.

ALMEIDA, C. C. Sistema Eletrônico baseado em diodos emissores de luz (LEDs) para aplicação em estudos de Fisiologia Vegetal, Dissertação de Mestrado, 2014a.

.

ASHDOWN, I. Photometry and Photosynthesis, Chief Scientist, Lighting Analysts, Dezembro 2014, p. 2 Disponível: <http://agi32.com/blog/2014/12/10/photometry-and-photosynthesis/>

BARNESL C., T. Tibbitts, J.Sager, G. Deitzer, D. Bubenheim, G. Koerner, e B. Bugbee “Accuracy of Quantum Sensors Measuring Yield Photon Flux and Photosynthetic Photon Flux” HORTSCIENCE vol. 28(no. 12) pag. 1197–1200. 1993.

BENDER, B. Metodologia de projeto eletrotérmico de LEDs aplicada ao desenvolvimento de sistemas de iluminação pública. Master Electrical Engineering Degree - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

BLACK D. L., “What is Yield Photon Flux (YPF), and is it good for comparing grow lights?” 2017 Disponível: https://www.blackdogled.com/faq_ypf

BULA R. J., R. C. Morrow, T. W. Tibbitts, D. J. Barta, R. W. Ignatius and T. S. Martin, "Ligth-emitting diodes as a radiation source for plants," *HortScience*, vol. 26, pp. 203 - 205, 1991.

CARTER, A. Facts about Light Emitting Diodes (LED), Janeiro 2012, Disponível: <https://www.eeweb.com/profile/andrew-carter/articles/facts-about-light-emitting-diodes-led>

COSTA, G. J. C. Iluminação econômica: cálculo e avaliação. : EDIPUCRS, 2006.

CRAIG D., "Controlling LED lighting systems: introducing the LED driver" LEDs Magazine, Dec, 2004 Disponível: <http://www.ledsmagazine.com/articles/2004/12/controlling-led-lighting-systems-introducing-the-led-driver.html>

DOUGHER T. A. and B. Bugbee, "Evidence for yellow light suppression of lettuce growth," *Photochem. Photobiol.*, vol. 73, pp. 208-212, Feb. 2001.

FLUENCE Bioengineering, Inc. , Horticulture Lighting Metrics, 2017 Disponível: <https://fluence.science/science/par-ppf-ppfd-dli/>

FREITAS, E. D. de. Notas de aula da Disciplina ACA-0429 Agrometeorologia, Instituto Astronomico e Geofisico, Universidade de São Paulo, 2005 p. 12-15.

FUTURE E. "What is an LED Driver?" Disponível: <http://www.futureelectronics.com/en/drivers/led-driver.aspx>

GOINS GD, Ruffe LM, Cranston NA, Yorio NC, Wheeler RM & Sager JC. Salad crop production under different wavelengths of red light-emitting diodes (LEDs). SAE Technical Paper, 31st International Conference on Environmental Systems, July 9–12, 2001, Orlando, Florida, USA: 2001. p. 1–9.

HERNÁNDEZ R., C. Kubota "Physiological, Morphological, and Energy-use Efficiency Comparisons of LED and HPS Supplemental Lighting for Cucumber Transplant Production" *HortScience* vol. 50 no.3 p.351-357, March 2015

HOENECKE M. E, R. J. Bula and T. W. Tibbitts, "Importance of 'blue' photon levels for lettuce seedlings grown under red-light-emitting diodes," *HortScience*, vol. 27, pp. 427-430, May. 1992.

KIM H. H., G. D. Goins, R. M. Wheeler and J. C. Sager, "Stomatal conductance of lettuce grown under or exposed to different light qualities," *Ann. Bot. (Lond)*, vol. 94, pp. 691-697, Nov. 2004.

KNEEN, "Small Scale & Organic Hops Production", Left Fields, BC

LAUBSCH, A. et al. High-Power and High-Efficiency InGaN-Based Light Emitters. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 57, n. 1, Janeiro 2010.

LECLAIRAGE, C. I. de. Terminology for photosynthetic active radiation for plants, 1993. v. 106/8.

LI H, Tang C, Xu Z, Liu X & Han X. Effects of different light sources on the growth of nonheading chinese cabbage (*Brassica campestris* L.). *J Agr Sci*. 2012;4:262–273.

MAYRAH, "Conheça a causa de todos os problemas do LED" 2017 Disponível: <http://www.febralux.com.br/calor-a-causa-de-todos-os-problemas-do-led-gerenciamento-termico/>

MCCREE, K. J. 1972b. "Tests of Current Definitions of Photosynthetically Active Radiation Against Leaf Photosynthesis Data," *Agricultural and Forest Meteorology* 10:443-453.

MCCREE, K. J. 1972a. "The Action Spectrum, Absorptance and Quantum Yield of Photosynthesis in Crop Plants," *Agricultural and Forest Meteorology* 9:191-216.

MÉNARD C., M. Dorais, T. Hovi and A. Gosselin, "Developmental and physiological responses of tomato and cucumber to additional blue light," *Acta Hort. (ISHS)*, vol. 711, pp. 291-296, 2006.

MOGO, S. Radiometria e Fotometria - Percepção Visual. Departamento de Física, Universidade da Beira Interior, 2014, Disponível: <http://www.dfisica.ubi.pt/~smogo/disciplinas/alunos/Radiometria.pdf>

OKAMOTO K., T. Yanagi, S. Takita, M. Tanaka, T. Higuchi, Y. Ushida and H. Watanabe, "Development of plant growth apparatus using blue and red LED as artificial light source," *Acta Hort. (ISHS)*, vol. 440, pp. 111-116, 1996.

OKAMOTO T. Yanagi and K., "Utilization of super-bright light emitting diodes as an artificial light source for plant growth," *Acta Hort. (ISHS)*, vol. 418, pp. 223-228, 1997

PEARSON, R. M. Smith, J. Chen, "Growth, Strobile Yield, and Quality of Four *Humulus lupulus* Varieties Cultivated in a Protected Open-sided Greenhouse Structure". *HortScience*, American Society for Horticultural Science, v. 51, 2016.

PINHO T. ROSVALL, E. T. M. E. P.; HALONEN, L. Light emitting diodes in plant growth: Comparative growth test in greenhouse and evaluation of photosynthetic radiation. Helsinki University of Technology, Department of Electronics – Lighting Unit, Espoo, Tech., 2008.

ROUT G. R. e BANDHU A. *Molecular Stress Physiology of Plants*, Springer, India, 2013.

ROYAL PHILIPS N. V. "Philips Horticulture LED Solutions - General booklet", 2015.

RUNKLE, E. Principles of light, *Orchids*, Vol.77, No. 5, May 2008. Disponível: <http://www.aos.org/orchids/additional-resources/principles-of-light.aspx>

SCHUERGER A. C, and C. S. Brown, "Spectral quality affects disease development of three pathogens on hydroponically grown plants," *HortScience*, vol. 32, pp. 96-100, Feb. 1997.

SCHUERGER A. C., C. S. Brown and E. C. Stryjewski, "Anatomical features of pepper plants (*Capsicum annuum* L.) grown under red light-emitting diodes supplemented with blue or far-red light," *Ann. Bot. (Lond)*, vol. 79, pp. 273-282, Mar. 1997.

SIMS DA & Pearcy RW. Response of leaf anatomy and photosynthetic capacity in *Alocasiamacrorrhiza* (Araceae) to a transfer from low to high light. *Am J Bot.* 1992;79:449–455.

SINGH Devesh, Chandrajit Basu, Merve Meinhardt-Wollweber, and Bernhard Roth, “LEDs for Energy Efficient Greenhouse Lighting”, Hannover Centre for Optical Technologies, Nienburger Str. 17, 30167 Hannover, Germany, Junho, 2014. Disponível: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1406/1406.3016.pdf>

SMITT, J. “LED grow lights. The right LED greenhouse lighting” 2016 Disponível: <https://gs-horti.com/articles/63-led-grow-lights-correct-lighting-for-the-greenhouse.html>

SMITT, J. LED grow lights. The right LED greenhouse lighting 2016 Disponível: <https://gs-horti.com/articles/63-led-grow-lights-correct-lighting-for-the-greenhouse.html>

STEIGERWALD D. A., J. C. Bhat, D. Collins, R. M. Fletcher, M. O. Holcomb, M. J. LUDOWISE, P. S. Martin and S. L. Rudaz, "Illumination with solid state lighting technology," *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 8, pp. 310-320, March- April 2002. 2002.

STUTTE GW, Edney S & Skerritt T. Photoregulation of bioprotectant content of red leaf lettuce with light-emitting diodes. *Hort Science.* 2009;44:79–82.

TAIZ L., E. Zeiger “Fisiologia Vegetal”, Artmed, 6a ed. Porto Alegre, 2017.

TAMULAITIS G., P. Duchovskis, Z. Bliznikas, K. Breive, R. Ulinskaite, A. Brazaityte, A. Novinkovas and A. Zukauskas, "High-power solid-state lighting facility for greenhouse vegetable cultivation," in *Light Sources 2004 – Proceedings of the 10th International Symposium on the Science and Technology of Light Sources Toulouse*, 2004, pp. 317-318.

TAVARES P. L., GUIMARAES I. A. B., H. BRAGA A. C , BENDER V. C., ALMEIDA P. S, “Led System with Independent Red and Blue Channels Employing Radiant Flux Estimation and Indirect Flux Control for Greenhouse Hop Cultivation”, COBEP 2017.

TAVARES, P. L. "Ensaio de Bloco de LEDs para Suplementação Luminosa com Lúpulo", NIMO, UFJF, 2017

US DEPARTMENT OF ENERGY. Solid-State Lighting Research and Development: Manufacturing Roadmap. p. 54, 2016.

VENTURA, F. Brasil proíbe lâmpadas incandescentes de 60W, e vai banir todos os modelos até 2016, Julho 2015 Disponível: <http://gizmodo.uol.com.br/brasil-proibe-lampadas-incandescentes/>

WHEELER, R. M., Mackowiak C. L. and Sager J. C., "Soybean stem growth under highpressure sodium with supplemental blue lighting," *Agron. J.*, vol. 83, pp. 903-906, Sep-Oct. 1991.

YAM, F.; HASSAN, Z. Innovative advances in led technology. *Microelectronics Journal*, Elsevier, v. 36, n. 2, p. 129{137, 2005.

YORIO N. C., G. D. Goins, H. R. Kagie, R. M. Wheeler and J. C. Sager, "Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation," *HortScience*, vol. 36, pp. 380-383, Apr. 2001.

YORIO NC, Goins GD, Kagie HR, Wheeler RM & Sager JC. Improving spinach, radish and lettuce growth under red light emitting didoes (LEDs) with blue light supplementation. *Hort Science*. 2001;36:380–383.

10 ANEXO

Datasheet LED vermelho

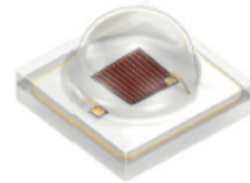
OSLON® SSL 120

Datasheet

Version 1.1



GH CSSPM1.24



New, higher performing OSLON SSL family LED with well known superior robustness, high reliability, long lifetime, low thermal resistance. Perfectly addressing applications demanding for high efficiency and long lifetime requirement.

Neue leistungsstärkere LED aus der OSLON SSL Familie mit altbekannter hoher Robustheit und Zuverlässigkeit, mit langer Lebensdauer und geringem thermischem Widerstand. Speziell entwickelt für Applikationen, bei denen hohe Effizienz und lange Lebensdauer gefragt ist.

Features:

- **Package:** SMT ceramic package with silicone resin and silicone lens
- **Viewing angle at 50 % I_v:** 120°
- **Color:** 660 nm (hyper red)
- **Radiant Flux:** typ. 425 mW
- **Radiant Efficiency:** typ. 56 %
- **Corrosion Robustness:** Superior Corrosion Robustness
- **Lumen Maintenance:** Test results according to IESNA LM-80 available

Besondere Merkmale:

- **Gehäusotyp:** SMT-Keramikgehäuse mit Silikonverguss und -linse
- **Abstrahlwinkel bei 50 % I_v:** 120°
- **Farbe:** 660 nm (hyperrot)
- **Strahlungsfluss:** typ. 425 mW
- **Lichtausbeute:** typ. 56 %
- **Korrosionsstabilität:** Höchste Korrosionsbeständigkeit
- **Lichtstromerhaltung:** Testergebnisse nach IESNA LM-80 verfügbar

Characteristics ($T_S = 25\text{ °C}$; $I_F = 350\text{ mA}$)

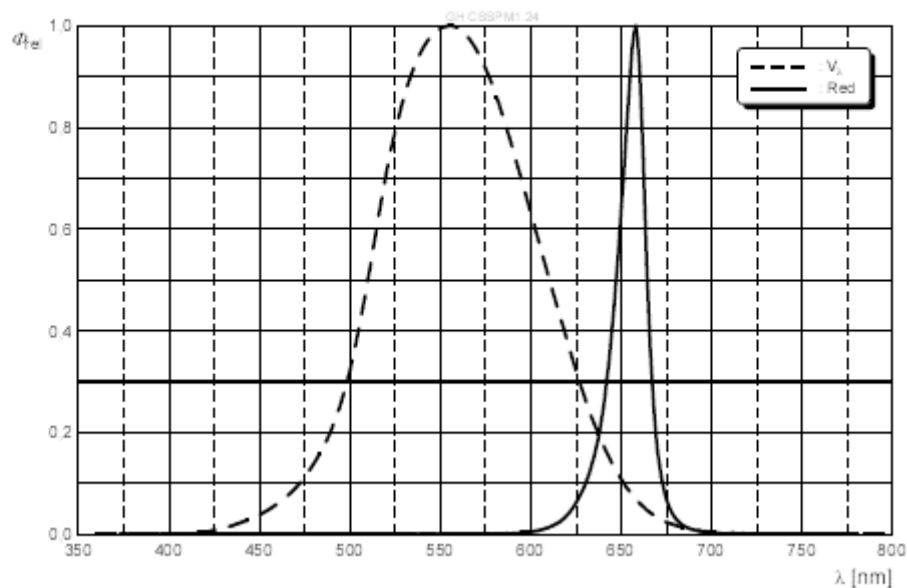
Kennwerte

Parameter Bezeichnung		Symbol Symbol	Values Werte	Unit Einheit
Wavelength at peak emission Wellenlänge d. emittierten Lichtes	(typ.)	λ_{peak}	660	nm
Centroid Wavelength Zentrumswellenlänge	(min.)	λ_{centr}	646	nm
	(typ.)	λ_{centr}	657	nm
	(max.)	λ_{centr}	666	nm
Dominant Wavelength ^{3) page 21} Dominantwellenlänge ^{3) Seite 21}	(typ.)	λ_{dom}	640	nm
Spectral bandwidth at 50% $I_{\text{rel max}}$ Spektrale Bandbreite b. 50% $I_{\text{rel max}}$	(typ.)	$\Delta\lambda$	25	nm
Viewing angle at 50% I_V Abstrahlwinkel bei 50% I_V	(typ.)	2ϕ	120	°
Forward voltage Durchlassspannung	(min.)	V_F	1.80	V
	(typ.)	V_F	2.15	V
	(max.)	V_F	2.60	V
Reverse voltage Sperrspannung ($I_R = 20\text{ mA}$)	(max.)	V_R	1.2	V
Real thermal resistance junction / solder point ^{4) page 21}	(typ.)	$R_{\text{th JS real}}$	5.3	K/W
	(max.)	$R_{\text{th JS real}}$	8.3	K/W
Realer Wärmewiderstand Sperrschicht / Löt-pad ^{4) Seite 21}				
"Electrical" thermal resistance junction / solder point ^{4) page 21}	(typ.)	$R_{\text{th JS el}}$	2.4	K/W
	(max.)	$R_{\text{th JS el}}$	3.7	K/W
"Elektrischer" Wärmewiderstand Sperrschicht / Löt-pad ^{4) Seite 21} (with efficiency $\eta_e = 55\%$)				

Relative Spectral Emission - $V(\lambda) = \text{Standard eye response curve}$ ^{5) page 21}

Relative spektrale Emission - $V(\lambda) = \text{spektrale Augenempfindlichkeit}$ ^{5) Seite 21}

$\Phi_{\text{rel}} = f(\lambda)$; $T_S = 25\text{ °C}$; $I_F = 350\text{ mA}$



Datasheet LED Azul

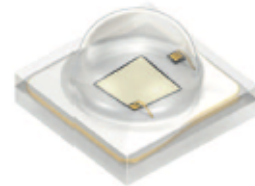
OSLON® SSL 120

Datasheet

Version 1.0



GD CSSPM1.14



New, higher performing OSLON SSL family LED with well known superior robustness, high reliability, long lifetime, low thermal resistance. Perfectly addressing applications demanding for high efficiency and long lifetime requirement.

Neue leistungsstärkere LED aus der OSLON SSL Familie mit altbekannter hoher Robustheit und Zuverlässigkeit, mit langer Lebensdauer und geringem thermischem Widerstand. Speziell entwickelt für Applikationen, bei denen hohe Effizienz und lange Lebensdauer gefragt ist.

Features:

- **Package:** SMT ceramic package with silicone resin and silicone lens
- **Viewing angle at 50 % I_v:** 120°
- **Color:** 451 nm (deep blue)
- **Radiant Flux:** typ. 690 mW
- **Radiant Efficiency:** typ. 69 %
- **Corrosion Robustness:** Superior Corrosion Robustness
- **Lumen Maintenance:** Test results according to IESNA LM-80 available

Besondere Merkmale:

- **Gehäusotyp:** SMT-Keramikgehäuse mit Silikonverguss und -linse
- **Abstrahlwinkel bei 50 % I_v:** 120°
- **Farbe:** 451 nm (deep blue)
- **Strahlungsfluss:** typ. 690 mW
- **Lichtausbeute:** typ. 69 %
- **Korrosionsstabilität:** Höchste Korrosionsbeständigkeit
- **Lichtstromerhaltung:** Testergebnisse nach IESNA LM-80 verfügbar

Version 1.0

GD CSSPM1.14

Characteristics ($T_S = 25\text{ °C}$; $I_F = 350\text{ mA}$)

Kennwerte

Parameter		Symbol	Values	Unit
Bezeichnung		Symbol	Werte	Einheit
Wavelength at peak emission Wellenlänge d. emittierten Lichtes	(typ.)	λ_{peak}	451	nm
Dominant Wavelength ^{3) page 21} Dominantwellenlänge ^{3) Seite 21}	(min.) (typ.) (max.)	λ_{dom} λ_{dom} λ_{dom}	439 455 461	nm nm nm
Viewing angle at 50 % I_V Abstrahlwinkel bei 50 % I_V	(typ.)	2φ	120	°
Forward voltage Durchlassspannung	(min.) (typ.) (max.)	V_F V_F V_F	2.75 2.85 3.25	V V V
Reverse voltage Sperrspannung ($I_R = 20\text{ mA}$)	(max.)	V_R	1.2	V
Real thermal resistance junction / solder point ^{4) page 21}	(typ.) (max.)	$R_{\text{th JS real}}$ $R_{\text{th JS real}}$	8.2 9.8	K/W K/W
Realer Wärmewiderstand Sperrschicht / Lötpad ^{4) Seite 21}				
"Electrical" thermal resistance junction / solder point ^{4) page 21}	(typ.) (max.)	$R_{\text{th JS el}}$ $R_{\text{th JS el}}$	2.6 3.1	K/W K/W
"Elektrischer" Wärmewiderstand Sperrschicht / Lötpad ^{4) Seite 21} (with efficiency $\eta_e = 68\%$)				

Relative Spectral Emission - $V(\lambda) = \text{Standard eye response curve}$ ^{5) page 21}Relative spektrale Emission - $V(\lambda) = \text{spektrale Augenempfindlichkeit}$ ^{5) Seite 21} $\Phi_{\text{rel}} = f(\lambda)$; $T_S = 25\text{ °C}$; $I_F = 350\text{ mA}$ 