

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PEDRO LAGUARDIA TAVARES

ANÁLISE E PROJETO DE ILUMINAÇÃO A LEDS DE CANAIS
VERMELHO E AZUL ORIENTADOS AO CULTIVO DE LÚPULO
(*Humulus lupulus* L.)

Juiz de Fora, MG - Brasil
2018

PEDRO LAGUARDIA TAVARES

ANÁLISE E PROJETO DE ILUMINAÇÃO A LEDS DE CANAIS
VERMELHO E AZUL ORIENTADOS AO CULTIVO DE LÚPULO
(*Humulus lupulus* L.)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Henrique Antônio Carvalho Braga, Dr. Eng,

Juiz de Fora, MG - Brasil
2018

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

Laguardia Tavares, Pedro.

Análise e projeto de iluminação a LEDs de canais vermelho e azul orientados ao cultivo de lúpulo (*Humulus lupulus L.*) / Pedro Laguardia Tavares. -- 2018.

92 p.

Orientador: Henrique Antônio Carvalho Braga

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, 2018.

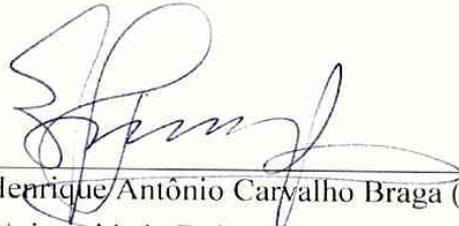
1. Iluminação Artificial. 2. Diodos Emissores de Luz. 3. Modelagem Radio-eleto-térmica de LEDs. 4. Estimacão de densidade de fluxo. 5. Sistema Fitométrico. I. Antônio Carvalho Braga, Henrique , orient. II. Título.

PEDRO LAGUARDIA TAVARES

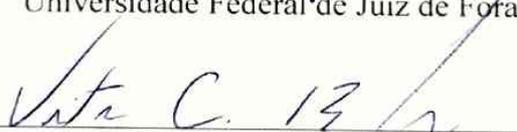
ANÁLISE E PROJETO DE LUMINÁRIAS A LEDS DE CANAIS
VERMELHO E AZUL ORIENTADAS AO CULTIVO DE LÚPULO
(*Humulus lupulus* L.)

Aprovada em 25 de setembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA



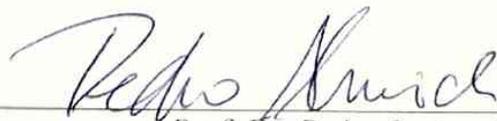
Prof. Dr. Henrique Antônio Carvalho Braga (Orientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Dr. Vitor Cristiano Bender
Universidade Federal de Santa Maria



Prof. Dr. Paulo Henrique Pereira Peixoto
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Dr. Pedro Santos Almeida
Universidade Federal de Juiz de Fora

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, que me inspiraram e sempre me apoiaram em meus estudos e minhas escolhas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Aduino e Rosane, por me incentivar e me introduzir ao meio acadêmico por meio do incentivo à leitura e pesquisas multidisciplinares. Além de serem fonte de inspiração como bons profissionais em suas respectivas áreas de atuação. Agradeço também a minha namorada, Marcia, pelo apoio e participação.

Ao meu orientador, Professor Dr. Henrique A. C. Braga, e a co-orientação de Dr. Pedro Almeida, pela participação assídua durante todo o processo desafiador de desenvolvimento deste trabalho.

Aos integrantes do laboratório NIMO pelo suporte nos diversos momentos necessários na etapa prática de projeto, em especial aos integrantes José e Vinícius. Além da orientação teórica na conduta acadêmica, em especial dos alunos doutorandos Dênis e Wesley.

Ao Laboratório de Fisiologia Vegetal do Departamento de Botânica da Universidade Federal de Juiz de Fora, em especial ao Professor Dr. Cristiano Ferrara e ao Professor Dr. Paulo Peixoto, pela facilitação da ponte multidisciplinar que permeia o trabalho.

Às empresas HOPs Brasil e OSRAM pelo interesse e suporte no fornecimento de materiais imprescindíveis para a condução da etapa experimental deste trabalho.

À Universidade Federal de Juiz de Fora por proporcionar estrutura para meu crescimento pessoal e profissional.

Ao corpo docente e coordenadores do curso, que em ambiente descontraído de aprendizagem, se mostraram empenhados na transferência de conhecimento aos alunos.

À CAPES e ao CNPQ pelo auxílio financeiro para as bolsas e verbas para os projetos pleiteados.

RESUMO

O cultivo de plantas por meio da suplementação ou do fornecimento integral de radiação empregando fontes de radiação artificiais vem se expandido significativamente com o desenvolvimento dos sistemas de iluminação a LED. Nesse contexto, este trabalho se fundamenta na investigação da relação entre as plantas e a radiação visando contribuir para a formação de uma base técnica e bibliográfica mais sólida tendo como base fatores como o fotoperíodo, o espectro eletromagnético e a densidade de fluxo. A partir dos estudos foi possível desenvolver de uma luminária dedicada ao atendimento integral da demanda diária de radiação de um exemplar de lúpulo adulto, obedecendo critérios estabelecidos considerando-se a proporção espectral de radiação, além da quantidade de fluxo exigido para o crescimento e a produção adequada da planta. O lúpulo foi escolhido como objeto de estudo devido a sua importância econômica no ramo da produção cervejeira e das restrições parciais de plantio visto que são plantas de regiões temperadas, justificando estudos com a planta em meio confinado e adequação em regiões cujas condições climáticas não sejam favoráveis. A luminária prototipada no trabalho foi alvo de estudos radiométricos, elétricos e térmicos no intuito de validar a sua modelagem RET (*radio-electro-thermal*) e a estimação da densidade de fluxo incidente na superfície do dossel. A validação RET se mostra viável em exatidão, com erro médio de 7,8%, e simplificação de implementação do controle da luminária por um método indireto de estimação de fluxo, através da aquisição de parâmetros estritamente elétricos (tensão e corrente média de cada canal). A validação da densidade de fluxo pelo sistema de quantificação fitométrica também se mostra viável para aplicação no dimensionamento em projetos de iluminação artificial para cultivo de plantas, com erro médio de 4,3% para o cenário avaliado de densidade de fluxo, sem necessidade do controle por meio de medidores radiométricos, que encarecem e aumentam a complexidade do projeto.

Palavras – Chave: Iluminação Artificial. Lúpulo. Diodos Emissores de Luz. Modelagem Radio-eletro-térmica de LEDs. Estimação de densidade de fluxo. Sistema Fitométrico.

ABSTRACT

The plant cultivation supplied partially or totally by artificial radiation source is increasing significantly according to the viability of LED lighting systems. In this context, this work contemplates the relation between plants and radiation in order to consolidate a technical bibliography content, which highlights aspects of photoperiod, electromagnetic spectrum and flux density. The approached studies have provided the development of a luminaire dedicated to attend integrally the radiation required by an adult Hop plant. Moreover, this issue is analyzed by focusing in the spectrum proportion, specific wavelength bands of radiation and flux density quantities defined backwards for healthy development and production of the plant. The hops has been chosen as research object due to its high economy importance in the brewery industry and its restrictions on being cultivated successfully mostly in temperate zones, which justifies studies on climatic adaptations where conditions are not favorable for the plant growth. The luminaire prototyped in this work targets studies on RET (radio-electro-thermal) model and flux density prediction incident on canopy surfaces. The RET validation has shown the model feasibility since the average error presented of 7.8% is reasonable low and facilitates the luminaire controllability by an indirect flux prediction method, through only electrical parameters (average voltage and current of each channel). The flux density prediction in the Phytometric system also presents viability for applications in lighting design while considering plant cultivation chambers. In this case, an acceptable average error of 4.3% has been found for the analyzed scenario, with no need of radiometric measurements that increase cost and complexity of the project.

Keywords: Artificial Light. Hops. Light-Emitting Diode. Radio-electro-thermal Characterization of LEDs. Radiant flux density prediction. Phytometric System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comparação da resposta visual fotópica do olho humano (CIE, 1993) e eficiência quântica relativa das plantas superiores (ALMEIDA, et al., 2014).....	21
Figura 2. Perdas totais no processo de conversão de energia solar em carboidratos pelas folhas (TAIZ & ZEIGER, 2009).	24
Figura 3. Curvas de resposta à absorção de CO ₂ em cinco espécies de plantas e indicação de PSL. Figura adaptada (LANGE, et al., 2012).....	24
Figura 4. Regiões de caracterização da curva de resposta de absorção de CO ₂	25
Figura 5. (a) Resposta de respiração celular em <i>Atriplex patula</i> sob cenários de baixa (azul claro), intermediária (azul intermediário) e alta (azul escuro) irradiância. (b) Limiar de compensação fótica de cada resposta. Figura adaptada (BJÖRKMAN & DEMMIG, 1987). .	26
Figura 6. Representação de grandezas radiométricas e quânticas no cenário de iluminação artificial com plantas.	27
Figura 7. Faixas de resposta fotossintética e de rendimento fotoquímico (Fv'/Fm') com regiões de máxima e mínima e linha média de aquisição em função da fixação de CO ₂ para: a) Cenário 1 e b) Cenário 2.	33
Figura 8. Curvas de absorvância das clorofilas <i>a</i> , <i>b</i> e dos carotenoides, comparação entre as curvas de absorvância total encontradas em literatura e a medida em laboratório para folha de lúpulo e espectro de emissão dos modelos de LEDs escolhidos para o projeto de luminária. .	34
Figura 9. Prognóstico do custo de LEDs por elementos de fabricação. Figura adaptada (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2016).....	39
Figura 10. Tendência de crescimento do mercado global de LEDs para aplicação em horticultura. Figura adaptada (LEDINSIDE, 2017).	39
Figura 11. Variação anual de radiação solar integral diária e mensal para latitude de 42°.	42
Figura 12. Ponto ótimo de produção fotossintética por YPF _D demandado pela luminária prototipada.	43
Figura 13. Fluxograma da segunda metodologia aplicada para estimativa de YPF _D do projeto.	44

Figura 14. Distribuição de intensidade de fluxo do LED azul modelo CSSPM1.14 (OSRAM Opto Semiconductors, 2016a).	47
Figura 15. Interpretação geométrica tridimensional do sistema fótico composto pela luminária pontual e o dossel da planta.....	48
Figura 16. Curvas de YPF estimado do APOLLO 600 para YPFD constante de $561 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, dossel entre 0,2 a 1 metro e distância variando de a) 0,3 a 0,6 e b) Figura ampliada para região de interesse.	49
Figura 17. Protótipo da luminária e layout de arranjo dos canais R e B em placa.....	52
Figura 18. Interações entre grandezas e térmica, elétricas e radiométricas em um sistema de iluminação a LED. Figura adaptada (BENDER, 2012).	53
Figura 19. Modelo elétrico linear equivalente aproximado de diodos emissores de luz.....	54
Figura 20. Sistema térmico em equivalência do circuito de um LED associado a uma placa <i>metal core</i> e dissipador.....	55
Figura 21. Circuito equivalente térmico da luminária prototipada incluindo os canais R e B.	56
Figura 22. Degradação de fluxo radiante por temperatura de junção do LED: (a) Vermelho e (b) Azul. Figura adaptada (OSRAM Opto Semiconductors, 2016a) (OSRAM Opto Semiconductors, 2016b).	57
Figura 23. Circuito equivalente térmico da luminária prototipada (TAVARES, et al., 2017).	59
Figura 24. Curvas características dos modelos de LED azul e vermelho de OSRAM (2016 ^a) e OSRAM (2016b) e extrapolação linear. (a) corrente por tensão, (b) fluxo radiante normalizado por corrente, (c) fluxo radiante normalizado por temperatura de junção e (d) variação de tensão terminal por temperatura de junção (TAVARES, et al., 2017).	62
Figura 25. Análise de luminária 2 pelo termovisor. a) e b) estão sem ventilação forçada e operando em 0,35 A e 1 A, respectivamente. c) e d) estão sob ventilação forçada e mesma corrente.	64
Figura 26. Comparação do desempenho radiométrico entre luminárias prototipadas, com e sem ventilação forçada e ideal linear.	64
Figura 27. Resultados de simulação do circuito equivalente térmico da luminária projetada para cada canal mostrados separadamente. A primeira tela mostra a potência elétrica e corrente total.	

A segunda tela mostra as temperaturas de junção e do dissipador. A terceira tela apresenta a resposta de fluxo normalizado com valor de base da folha de dados.....	66
Figura 28. Região ampliada na dinâmica de eventos térmicos proveniente de alteração de fluxo dos canais azul e vermelho nos eventos de mudança de referência de fluxo (100 s para canal azul e 200 s para canal vermelho).	67
Figura 29. Arranjo experimental de medição radio-eletro-térmicas para validação da modelagem RET.....	68
Figura 30. Detalhes do experimento de validação RET em andamento.....	69
Figura 31. Comparação de resultados de fluxo radiante por canal e total, encontrados para operação de dois canais em simultâneo e sem ventilação forçada.	71
Figura 32. Comparação de resultados de fluxo radiante por canal e total, encontrados para operação de dois canais em simultâneo e com ventilação forçada.....	71
Figura 33. Comparação de resultados de fluxo radiante por canal e total, encontrados para operação de dois canais em simultâneo e sem ventilação forçada.	72
Figura 34. Arranjo experimental com difusor cossenoidal para aquisição de YPFD em plano virtual (dossel) com altura ajustável.....	75
Figura 35. A) Comparação de resultados da luminária Apollo por estimacão e por experimento de densidade de fluxo YPFD em função de distância para três diâmetros de dossel diferentes. B) Resultados ampliados na região do YPFD desejado ($561 \mu\text{mol}/\text{m}^2$).....	76
Figura 36. (a) Distribuição da densidade de fluxo calculado em disposição tridimensional e (b) corte transversal de densidade de fluxo calculado em comparação com o medido em função do raio. Plano de 0,8 m de diâmetro e altura de 50 cm para luminária Apollo.	76
Figura 37. A) Comparação de resultados da luminária RB por estimacão e por experimento de densidade de fluxo YPFD em função de distância para três diâmetros de dossel diferentes. B) Resultados ampliados na região do YPFD desejado ($561 \mu\text{mol}/\text{m}^2$).....	77
Figura 36. (a) Distribuição da densidade de fluxo calculado em disposição tridimensional e (b) corte transversal de densidade de fluxo calculado em comparação com o medido em função do raio. Plano de 0,8 m de diâmetro e altura de 50 cm para luminária RB.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores fotoperíodo e de radiação incidente nas plantas e fotoperíodo para os dois cenários listados.....	32
Tabela 2. Comparação da viabilidade econômica para lâmpadas HPS, LED e fluorescente (NELSON & BUGBEE, 2014).....	40
Tabela 3. Valores de YPFD encontrados para os três métodos sugeridos.	45
Tabela 4. Valores de potência e de fluxo por modelo unitário e canal de LEDs.	51
Tabela 5. Parâmetros encontrados pela extrapolação das curvas da Figura 24.	61
Tabela 6. Resumo de erro dos ensaios realizados em relação aos valores empíricos obtidos na Esfera Integradora.	74

SUMÁRIO

1. Introdução.....	15
1.1 Motivação	15
1.2 Proposta do trabalho	15
1.3 Estrutura da Dissertação	16
2. Radiação e fisiologia vegetal.....	18
2.1 Aspectos da interação entre a radiação e plantas	18
2.1.1 Fotoperíodo e ritmo circadiano	19
2.1.2 Espectro eletromagnético de emissão e absorção	20
2.1.3 Intensidade radiante e respostas de absorção das plantas.	22
2.2 Conceitos de radiação eletromagnética direcionados à radiação fotossinteticamente ativa (PAR)	26
2.2.1 Sistemas de medição de radiação.....	27
2.2.2 Grandezas radiométricas e quânticas	28
2.3 Objeto de estudo – Lúpulo (<i>Humulus lupulos</i>).....	30
2.3.1 Revisão Bibliográfica sobre a planta	30
2.3.2 Experimentos iniciais com a planta	31
2.4 Considerações finais do capítulo	34
3. Iluminação artificial no cultivo de plantas: projeto de luminária.....	36
3.1 Tipos de iluminação aplicadas em horticultura	37
3.2 Projeto da luminária.....	40
3.2.1 Estimativa radiométrica e quântica.....	41
3.2.1.1 Estimativa de densidade de fluxo YPFD requerido	41
3.2.1.2 Estimativa de fluxo YPF para o sistema	46
3.2.2 Arranjo dos LEDs e estrutura da luminária	50
3.2.3 Modelagem PET	52
3.2.3.1 Modelo Elétrico.....	54

3.2.3.2	Modelo térmico do arranjo e dimensionamento do dissipador	55
3.2.3.3	Princípio de estimação da temperatura e fluxo radiante	57
3.2.4	Resultados de caracterização e validação da luminária	62
3.2.4.1	Validação experimental do projeto do dissipador.....	63
3.2.4.2	Validação teórica de modelo RET por <i>software</i>	65
3.2.4.3	Validação empírica de estimador de fluxo pela modelagem RET	68
3.2.4.4	Validação empírica da estimação da densidade de fluxo.....	73
3.3	Considerações finais do capítulo	78
4.	Conclusões e propostas para trabalhos futuros.....	82
5.	Referências bibliográficas	86
6.	Anexo – Fluxograma de projeto de luminária voltada ao cultivo de plantas	92

1. Introdução

1.1 Motivação

O mercado voltado ao cultivo de plantas sob iluminação artificial vem apresentando um grande crescimento em meio à expansão da tecnologia de diodos emissores de luz (LED), principal fator de viabilização desses sistemas. Sendo assim, a indústria de luminárias LED e as pesquisas na área tendem a acompanhar essa demanda com aumentos na disponibilidade de modelos e de recursos para o atendimento de diversas plantas empregadas na horticultura e floricultura (mercados com maior uso da iluminação artificial). Pelo caráter atual e multidisciplinar das pesquisas nessa área, ainda existe um considerável déficit no embasamento científico nas áreas da Física e da Engenharia Elétrica para a integralização desses sistemas, sendo mais explorado nas áreas biológicas.

Apesar de um grande volume de estudos publicados, pouca ênfase tem sido dada às abordagens multidisciplinares de pesquisa envolvendo a interação entre as áreas biológicas e de engenharia elétrica. Este trabalho teve como motivação principal contribuir para novas pesquisas na área de iluminação artificial para plantas, aproveitando do potencial de produção científica inovadora em decorrência das contribuições procedentes da Engenharia Elétrica. Adicionalmente, o presente trabalho teve o intuito de diminuir o déficit em pesquisas na área apresentando análises relacionadas à viabilidade técnica e de implementação em projetos de luminárias e de salas de crescimento utilizadas para a suplementação e atendimento integral da radiação necessária para o cultivo de plantas, corroborando com diretrizes determinadas a partir de uma revisão bibliográfica concisa da relação entre as plantas e a radiação.

1.2 Proposta do trabalho

O presente trabalho baseia-se nas necessidades dos sistemas de cultivo de plantas sob iluminação artificial considerando os vieses industrial e acadêmico. Pelo aspecto

industrial, o trabalho apresenta metodologias para a quantificação de densidade de fluxo ótimo para atender a demanda das plantas sem comprometer a produção, gerando maior economia de energia em virtude da redução de potência da luminária instalada e o consumo de energia elétrica. Também foi abordado a estimação do fluxo de modo indireto pela caracterização radio-eletro-térmica da carga do LED. Essa abordagem proporciona um controle de fluxo mais exato, de menor custo e complexidade, através de aquisições restritamente elétricas, sem a necessidade de medição da temperatura da luminária. Ainda nesse contexto, foi proposto a estimação da densidade de fluxo por radiação direta como meio de se estimar a demanda de potência da luminária necessária para projetos de iluminação de salas de crescimento, visando as necessidades específicas de plantas de lúpulo.

Com relação ao viés acadêmico, a luminária foi prototipada visando à validação de hipóteses futuras, analisadas por meios empíricos, para uma avaliação mais consistente entre o comportamento das plantas sob fenômenos fóticos como a cintilação luminosa e a dimerização ao longo do dia e do ano concordando com a eficiência fotoquímica máxima da planta para os respectivos períodos, ajuste de fotoperíodo (como elemento de estímulo de produção) e manipulação da proporção de espectro entre as regiões do vermelho e azul.

1.3 Estrutura da Dissertação

Primeiramente, o texto foi organizado para fornecer os conceitos básicos necessários nos âmbitos da física e fisiologia vegetal, de forma a integrá-los e direcioná-los para as devidas considerações na problematização do projeto. Em sequência, foi apresentada uma proposta de resolução do problema por meio da elaboração de um protótipo de luminária condizente com os estudos levantados e desenvolvidos durante o trabalho. Para permanecer coeso ao objetivo do projeto, procurou-se apresentar um texto como conclusão ao final dos capítulos dois e três, evidenciando a colaboração da sessão para o desenvolvimento final do dispositivo.

O segundo capítulo apresenta estudos de fisiologia vegetal direcionados aos fenômenos relacionadas à radiação, com foco na produção fotossintética, elemento chave para o cultivo do lúpulo. Com isso, se segmenta o estudo em três principais aspectos: fotoperiodismo, espectro eletromagnético emitido pela fonte e absorvido pela planta e

quantificação da densidade de fluxo aproveitado pela planta. Após traçado a problematização através do escopo consolidado na revisão bibliográfica sobre o assunto, o capítulo três dedica-se ao desenvolvimento e à caracterização radio-eleto-térmica da luminária, por intermédio de um estudo extensivo de modelagem por equações matemáticas com as respectivas validações dos modelos por meio de simulações e no âmbito experimental. O capítulo quatro apresenta as conclusões decorrentes dos resultados do projeto e sugestão de trabalhos futuros à partir das hipóteses formuladas ao longo das investigações e das revisões bibliográficas relacionadas à fisiologia vegetal, iluminação a LED e aos circuitos de acionamentos dedicados ao controle do sistema.

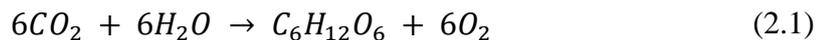
2. Radiação e fisiologia vegetal

Os fatores ecológicos que influenciam no desenvolvimento de plantas podem ser classificados como externos ou internos. A estrutura foliar e o teor de pigmentos são exemplos de fatores internos, enquanto que a radiação, temperatura, água e concentração de CO₂ são os principais fatores externos (COSTA, 2006).

Dentre os fatores externos, a radiação é o foco deste capítulo, que trata de sua relação com o desenvolvimento das plantas considerando os aspectos de intensidade radiante, espectro eletromagnético e fotoperíodo. Posteriormente é apresentada uma discussão do método mais adequado para mensuração e interpretação física da radiação incidente nas plantas. Em seguida são descritos as características e os comportamentos específicos principais do objeto de estudo elegido no presente trabalho, o lúpulo (*Humulus lupulus* L.), bem como as razões para a sua escolha. A última sessão do capítulo aborda uma síntese das principais conclusões extraídas da revisão bibliográfica do assunto, assim como o estabelecimento de uma conexão com o conteúdo tratado no capítulo seguinte.

2.1 Aspectos da interação entre a radiação e plantas

Os fenômenos mais discutidos na literatura relativos à radiação são o fototropismo, a fotomorfogênese, o efeito de sincronização por fotoperíodo, a fotoinibição, a fluorescência e a fotossíntese (COSTA, 2006) (PINHO, 2008) (TAIZ et al., 2014). O fototropismo resulta da movimentação das plantas em resposta aos estímulos de radiação ao seu redor. A fotomorfogênese é resultado do desenvolvimento estrutural das plantas e da variação no metabolismo celular em resposta a radiação submetida (TAIZ et al., 2014). Já a fotossíntese, processo mais estudado envolvendo a interação das plantas com a radiação, é definida como um processo quântico através do qual o organismo fotossintético sintetiza carboidratos e libera oxigênio. Essa energia pode ser usada para o desenvolvimento da planta ou como fonte de substrato respiratório para outros seres vivos. A equação química geral da fotossíntese é mostrada em (2.1) (TAIZ et al., 2014):



dióxido de água carboidrato oxigênio
carbono

Os efeitos da sincronização das plantas, a fluorescência e a fotoinibição serão discutidos separadamente nas próximas sessões ao tratar, respectivamente, dos aspectos de fotoperiodismo, espectro eletromagnético e intensidade da radiação em função da resposta vegetal.

2.1.1 Fotoperíodo e ritmo circadiano

O fotoperíodo é definido como a fase em que há presença de radiação luminosa durante o período de 24 horas. Em ambientes naturais, esse regime luminoso está diretamente relacionado com o movimento de rotação e translação terrestres em associação com a sua inclinação (SIMONS & BEAN, 2001). Em um contexto ecológico, o fotoperíodo é um instrumento de medição e identificação das estações, determinando o clima e o tempo com precisão para os seres vivos (EDGAR, et al., 2012).

O fotoperíodo tem seu início ao nascer e encerramento ao pôr do Sol (SIMONS & BEAN, 2001). Na Astronomia, considera-se o nascer do Sol quando o limbo superior do mesmo tangencia a linha do horizonte visual da região observada ao nível do mar. Da mesma forma, é assumido para o pôr do Sol (MIGUENS, 1999). Porém, o efeito de iluminação de uma região ocorre antes mesmo do Sol surgir no horizonte. Este período é denominado crepúsculo e ocorre tanto para o início quanto para o término do dia.

O crepúsculo pode ser náutico (entre 12 e 6 graus abaixo da linha horizontal), astronômico (entre 18 e 12 graus abaixo) ou civil (de 6 a 0 graus abaixo). Para efeitos de simplificação da análise de fotoperíodo, o efeito crepuscular no Lúpulo não foi contemplado neste trabalho, devendo ser investigado em trabalhos futuros.

Muitos dos processos metabólicos das plantas são baseados em estados cíclicos que ocorrem, geralmente, em períodos específicos do dia, como respiração e liberação de oxigênio (TAIZ et al., 2014). Essas alterações rítmicas são denominadas ritmos circadianos e podem ser conduzidas a partir de estímulos exógenos ou endógenos, atingindo todos os seres vivos (MARTYNHAK, et al., 2012). O ciclo circadiano endógeno é proveniente da oxidação e da redução cíclica de peroxirredoxinas que ocorrem em um intervalo aproximado de 24 horas em células eucariontes (EDGAR, et

al., 2012). Portanto, a modulação das estações do ano através do ajuste do fotoperíodo em ambientes controlados pode provocar alterações correlacionadas às dinâmicas fisiológicas das plantas, como, por exemplo, a indução de floração em plantas de lúpulo (THOMAS & SCHWABE, 1969) (CRAIN, 2011) e outras herbáceas (KING, 2006). Também se tem evidências de alterações fisiológicas no estágio de crescimento vegetativo, como em experimentos com morangueiros (LI, et al., 2012), espinafre, alface e rabanete (YORIO, et al., 2001).

O processo de emulação das estações climáticas foi aplicado na condução de um experimento pioneiro de cultivo de Lúpulo com suplementação luminosa na Universidade Estadual do Colorado pelo Professor Dr. Bill Bauerle. Os resultados preliminares já se mostram expressivos, com indução de até quatro florações anuais, evidenciando a potencialidade da manipulação do fotoperíodo no cultivo e produção de lúpulo em ambientes controlados (“*indoor*”) (VARGA, 2017).

2.1.2 Espectro eletromagnético de emissão e absorção

A distribuição espectral eletromagnética de uma fonte luminosa depende da caracterização do conjunto de fótons emitidos pela mesma. Um fóton é proveniente da diferença de energia entre a banda proibida e a energia em que o elétron se encontra em excitação. Quando o elétron retorna ao seu estado natural, a energia remanescente é emitida na forma de fóton e em uma frequência específica de acordo com a equação (2.2) (COATON & MARSDEN, 2012) (PEREIRA, et al., 2007).

$$E_{\lambda} = hc/\lambda \quad (2.2)$$

, em que E_{λ} é a energia associada ao fóton, h é a constante de Planck ($\approx 6,63 * 10^{-34} Js$), λ é o comprimento de onda específico do fóton e c é a velocidade de propagação da radiação ($\approx 3 * 10^8 m/s$).

Na área de iluminação, os fenômenos ópticos não dependem apenas do emissor (fonte luminosa), mas também do meio de propagação e da superfície receptora da radiação. Esses fatores relativizam a absorção da energia radiante pelas plantas uma vez que as mesmas absorvem em faixas específicas do espectro eletromagnético. A curva de eficiência quântica relativa (RQE, *Relative Quantum Efficiency*) está associada com a eficácia de absorção da radiação e com o uso da mesma na produção fotossintética pela

planta em função do comprimento de onda, ao longo do espectro eletromagnético (McCREE, 1972) (BARNES, et al., 1993) (ALMEIDA, et al., 2014).

A Figura 1 mostra uma comparação da RQE média das plantas superiores com a resposta da sensibilidade visual fotópica do olho humano (SVFH). Pode-se observar na Figura 1 que as curvas mostradas são completamente distintas entre si, tendo a RQE picos de maior eficácia na região de 432 nm e 630 nm (ALMEIDA, et al., 2014). Como as plantas superiores compartilham os mesmos pigmentos fotossintéticos para absorção de radiação (clorofila *a*, clorofila *b* e carotenoides), a curva RQE sofre pequenas variações, consequentes apenas da diferença de concentração dos pigmentos fotossintéticos entre espécies de plantas (HOGEWONING, et al., 2012).

A influência do espectro eletromagnético no contexto de fisiologia vegetal pode ser abordada no estudo de duas grandes famílias: os fitocromos e os criptocromos/fototropinas. Os fitocromos são pigmentos fotorreceptores que respondem predominantemente na região do espectro de comprimento de ondas mais longas, em termos antropocêntricos, na região do vermelho. Esses pigmentos são responsáveis por muitos fenômenos fotomorfogênicos das plantas, com destaque para o desenvolvimento e para o metabolismo celular atrelados à plasticidade morfológica das plantas, como: germinação, crescimento, desenvolvimento reprodutivo e sincronização circadiana. Já os criptocromos e as fototropinas são exemplos de uma grande família de pigmento relacionados a fenômenos decorrentes do estímulo pela radiação em comprimento de

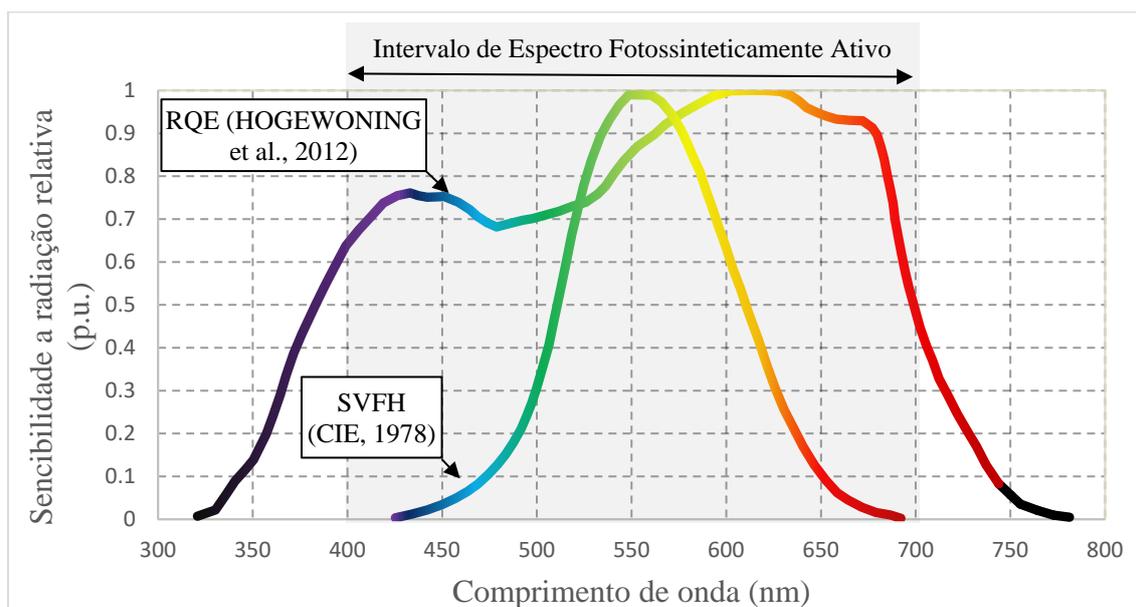


Figura 1. Comparação da resposta visual fotópica do olho humano (CIE, 1993) e eficiência quântica relativa das plantas superiores (ALMEIDA, et al., 2014).

ondas mais curtas (região do azul). Esses fotorreceptores são responsáveis pelo fototropismo, movimentos estomáticos, inibição de estiolamento (alongamento de caule), biossíntese de pigmentos e na sincronização circadiana (TAIZ et al., 2014) (CHRISTOPHE, et al., 2006). Portanto, emissão em regiões do espectro eletromagnético do azul e do vermelho são complementares e essenciais para a dinâmica de desenvolvimento das plantas devido ao desencadeamento de respostas fisiológicas específicas associadas ao intervalo de radiação.

Além disso, outra questão pertinente a ser apontada sobre bandas espectrais é o “Efeito de Melhora”, ou *Enhancer Effect*, que evidencia resposta mais eficiente das plantas à exposição concentrada em intervalos de espectro mais amplos na região do vermelho, conforme relatado por Taiz (2014) e corroborado por Shimada e Taniguchi (2011) em experimentos com a herbácea *Arabidopsis thaliana*.

Outros estudos também evidenciam a suscetibilidade das plantas à variações do espectro eletromagnético de radiação submetida, conforme estudos envolvendo análises de crescimento e de fotomorfogênese em pimenteiras (BROWN, et al., 1995), efeitos de iluminação a LED em morangos (LI, et al., 2012), separação de reações fisiológicas por intervalos espectrais (SINGH, et al., 2015) (HARUN, et al., 2015) e da comparação com suplementações diferenciadas em espectro para o cultivo de pepino (HERNANDEZ & KUBOTA, 2015).

2.1.3 Intensidade radiante e respostas de absorção das plantas.

A eficiência total máxima (referente ao comprimento de onda de 630 nm) que a taxa fotossintética pode atingir é de apenas 27% da energia radiante incidente na planta. Isto se deve às perdas ao longo do processo fotossintético, que apresenta duas etapas: a fotoquímica e a bioquímica. Essa eficiência é mensurada através da produtividade quântica, P_λ , expressa pela equação (2.3) (TAIZ et al., 2014).

$$P_\lambda = \frac{n_f}{n_q} \quad (2.3)$$

, em que n_f é o número de produtos fotoquímicos e n_q é o número total de quanta absorvidos pelo processo.

A etapa fotoquímica é caracterizada pela absorção da radiação pelos pigmentos fotossintéticos e pelo início do transporte de elétrons nos cloroplastos. Nessa etapa se verifica uma perda inerente e dependente do espectro de iluminação que incide na folha. Considerando a radiação solar para o processo, grande parte da mesma é refletida na região entre 500 e 600 nm e, portanto, a produtividade quântica não é plena (perda de cerca de 60% em se tratando da radiação solar direta) (TAIZ et al., 2008).

Na etapa bioquímica as perdas são ainda mais significativas por envolver limitações na transformação da energia. Os fótons absorvidos pelas folhas no processo anterior (fotoquímico) são quase que 100% utilizados na produção fotoquímica (excitação de elétrons) quando considerada a radiação entre os intervalos de 400-700 nm, porém, a energia contida em cada fóton geralmente excede em grande quantidade a energia livre necessária para a ativação do processo de fotossíntese mostrado pela equação (2.1), sendo o restante liberado na forma de calor pela planta (TAIZ et al., 2014). Portanto, a conversão da energia radiante em energia química destinada a atender as funções fisiológicas das plantas tem valores consideravelmente inferiores a 27%, já que a eficiência fotossintética é relativa ao espectro e a intensidade de radiação incidente na folha em conjunto com outros fatores de degradação na eficiência de absorção, como temperatura (PALMA, et al., 2015) (GIILMANOV, et al., 2007). Neste contexto, a Figura 2 mostra, de forma sucinta, a cadeia de perdas médias de energia em uma planta submetida a radiação solar.

A intensidade radiante mais adequada varia para cada espécie de planta e com o cenário de irradiância média a qual a mesma está inserida. Isso ocorre devido a sua morfologia foliar ser adaptável ao ambiente (MURCHIE & HORTON, 1997). O tratamento do conceito de “irradiância” será trabalhado no subcapítulo posterior.

O intervalo de irradiância adequado para cultivo de uma planta pode ser obtido à partir da curva de resposta de absorção de gás carbônico ou liberação de oxigênio em função da elevação na radiação absorvida pelas folhas (BJÖRKMAN & DEMMIG, 1987) (TAIZ et al., 2014). A Figura 3 apresenta as curvas de incorporação de gás carbônico em resposta à variação da irradiância para cinco espécies de plantas: *Encelia californica* N., *Nerium oleander* L., *Atriplex triangulares* Lind., *Panicum maximum* Jacq. e *Cordyline rubra* Otto & A.Dietr. Esse método de análise permite correlacionar a produção fotossintética de forma indireta através do monitoramento do consumo de gás carbônico pelas plantas em resposta ao aumento de densidade de fluxo submetida.

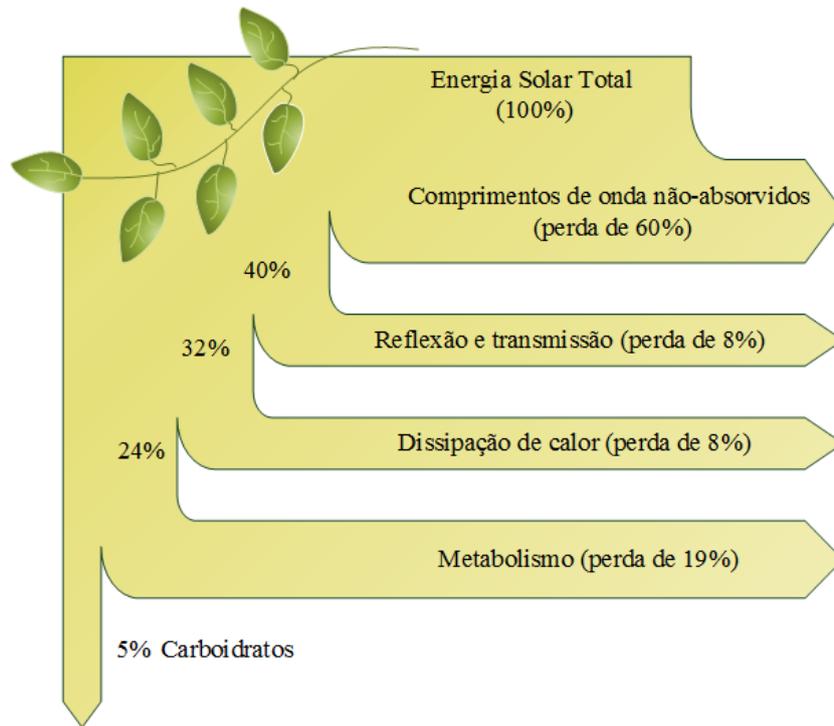


Figura 2. Perdas totais no processo de conversão de energia solar em carboidratos pelas folhas (TAIZ & ZEIGER, 2009).

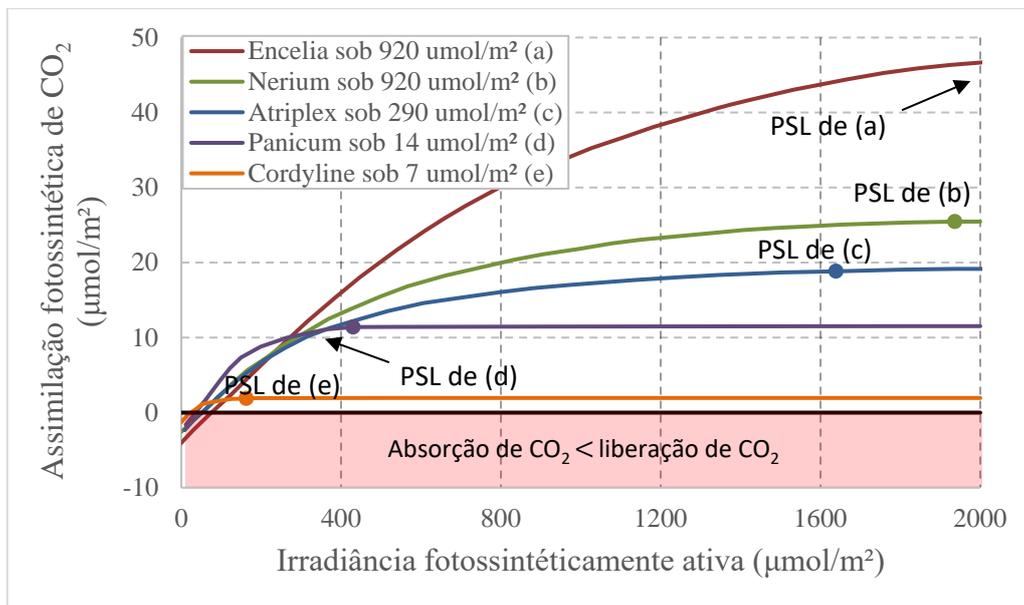


Figura 3. Curvas de resposta à absorção de CO₂ em cinco espécies de plantas e indicação de PSL. Figura adaptada (LANGE, et al., 2012).

As espécies mostradas na Figura 3 foram cultivadas em diferentes cenários de irradiação média, como especificado na legenda. Pela análise da figura, observa-se uma variação logarítmica na taxa de absorção de gás carbônico para todas as espécies estudadas, apresentando seus respectivos pontos de saturação luminosa (PSL). Essa

caracterização de curva é comum às fanerógamas (CHEN, et al., 2011) e pode ser subdividido em quatro regiões, conforme mostrado na Figura 4.

A primeira região refere-se a uma taxa negativa de incorporação de CO_2 , ou seja, a produção de carboidratos proveniente da fotossíntese não é suficiente para atender a demanda da respiração celular da própria planta (região de escuro). Em seguida, a curva passa pelo ponto de compensação fótico (PCF), onde a incorporação de CO_2 se iguala com o que é produzido pela planta. Nessa segunda região, há um saldo positivo na assimilação de CO_2 e a produção fotossintética aumenta em uma relação linear com a irradiância exposta. Isto significa que, nessa região, a fotossíntese está limitada a quantidade de irradiância fornecida. Na terceira região, observa-se uma queda na taxa de incorporação de CO_2 devido a aspectos limitantes no processo fotossintético (carboxilação ou metabolismo limitado) caracterizando uma fotoinibição dinâmica. Já na quarta região, com seu início identificado pelo ponto de saturação luminosa (PSL), ocorre uma saturação na incorporação de CO_2 com o aumento da irradiância, caracterizando uma fotoinibição crônica (TAIZ et al., 2014). A linha tracejada em vermelho indica o comportamento linear ideal na produção fotossintética em resposta radiação incidente e, portanto, a taxa fotossintética máxima constante de resposta fotossintética.

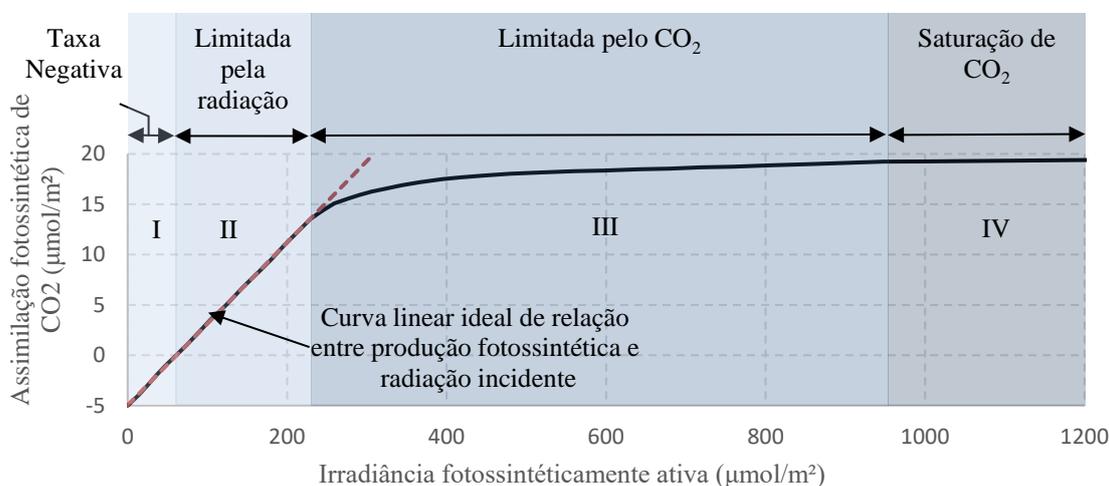


Figura 4. Regiões de caracterização da curva de resposta de absorção de CO_2 .

A resposta fotossintética à intensidade de radiação não é restrita apenas a variações de ordem específica. Como relatado anteriormente, devido à capacidade de adaptação das plantas a diferentes ambientes (morfologia foliar mutável ou fotomorfogênese), uma mesma espécie pode apresentar curvas de respostas luminosas distintas para diferentes cenários de irradiação, conforme mostrado na Figura 5, para a

espécie *Atriplex patula* sob cenários de irradiância média de 920 (a pleno Sol e para fotoperíodo de 12 horas), 290 e 92 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$.

O grau de distinção das curvas, ou seja, a plasticidade morfológica das folhas varia de espécie para espécie. Como a caracterização das respostas a radiação se altera, as regiões apontadas anteriormente também mudam seus intervalos devido à variação na densidade de fluxo. A Figura 5(b) focaliza a região de relativa baixa densidade de fluxo para *A. patula*, indicando os deslocamentos dos PCFs e a região de comportamento linear de absorção do CO_2 . Diante desse cenário de ajuste morfofisiológico, o presente trabalho propõe três métodos de estimativa do ponto ótimo de produção fotossintética por irradiância demandada que serão apresentados na subseção 3.2.1.1.

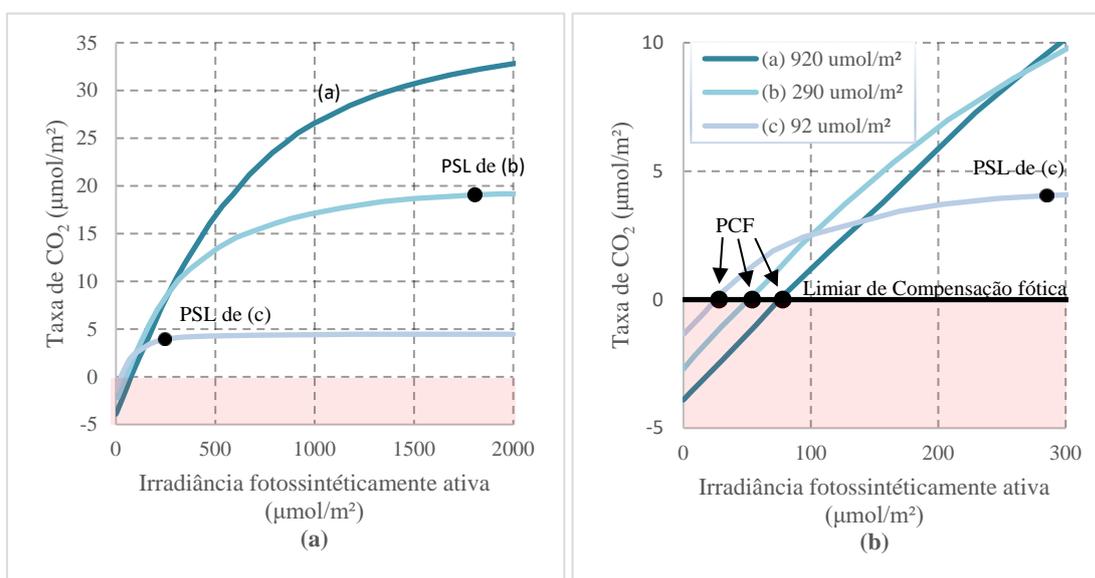


Figura 5. (a) Resposta de respiração celular em *Atriplex patula* sob cenários de baixa (azul claro), intermediária (azul intermediário) e alta (azul escuro) irradiância. (b) Limiar de compensação fótica de cada resposta. Figura adaptada (BJÖRKMAN & DEMMIG, 1987).

2.2 Conceitos de radiação eletromagnética direcionados à radiação fotossinteticamente ativa (PAR)

Este subcapítulo trata dos conceitos radiométricos e quânticos referentes à radiação eletromagnética com objetivo de embasar o texto para citação posterior destes parâmetros direcionados a aplicações adequadas ao reino vegetal.

2.2.1 Sistemas de medição de radiação

Como abordado na sessão 2.1.2 a análise da radiação em um sistema é feita considerando a fonte radiante, o meio de propagação e a superfície de incidência da radiação. Esta sessão irá tratar apenas das grandezas radiométricas e quânticas voltadas à representação de parâmetros da interação entre fonte radiante (radiação solar ou por luminária) e superfície (folhas e dossel das plantas), conforme mostrado sucintamente na Figura 6. Pode-se adiantar que os conceitos e as grandezas fotométricas não serão contempladas neste trabalho por não se apresentarem adequados para análises com o reino *Plantae*, já que os mesmos estão relacionados a percepção da radiação pelo olho humano (McCREE, 1972) (LECLAIRAGE, 1993).

A radiometria é a ciência que se dedica ao estudo das transferências de energia radiativa e está atrelada ao sistema de medição radiométrico, o qual não relativiza o aspecto óptico do receptor ao quantificar a radiação. Sendo assim, é considerada a totalidade do espectro eletromagnético em seus cálculos (COATON & MARSDEN, 2012).

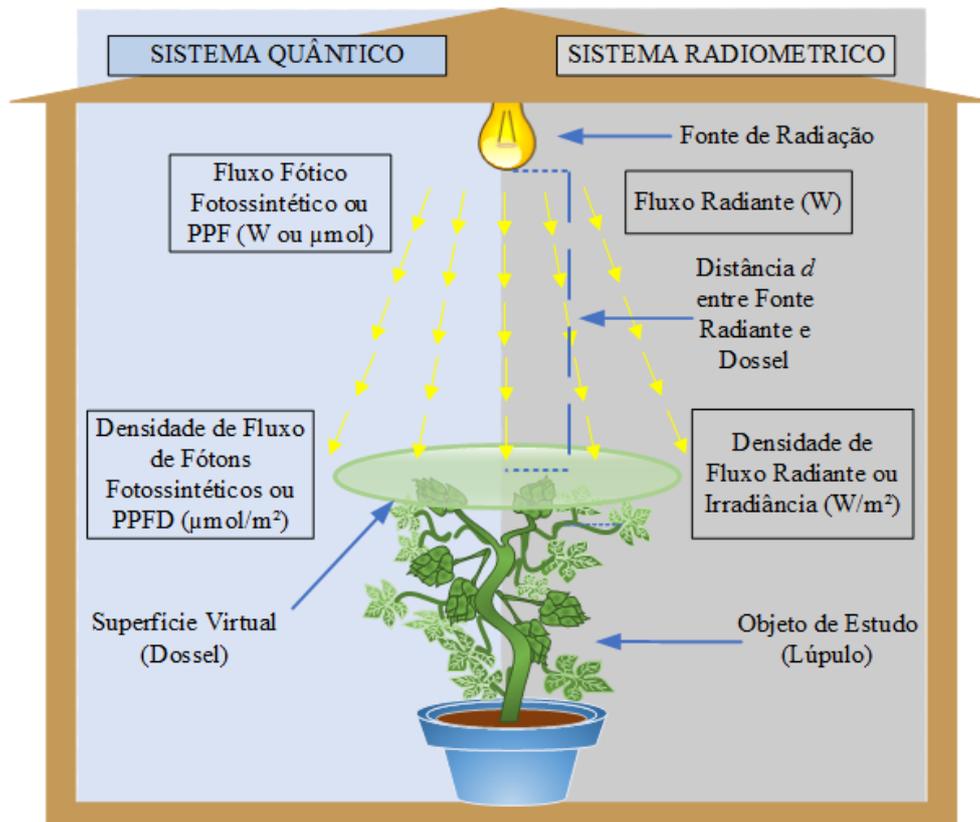


Figura 6. Representação de grandezas radiométricas e quânticas no cenário de iluminação artificial com plantas.

Já o sistema quântico está atrelado à quantização da radiação em partículas, através dos fótons, que são representações de porções que possuem uma dada energia eletromagnética proporcional a sua frequência de emissão. Esse sistema é mais adequado para quantificação radiativa restrita a região do espectro ao qual as plantas utilizam para realizar da fotossíntese, já que este processo é um processo quântico (McCREE, 1972) (PINHO, 2008).

2.2.2 Grandezas radiométricas e quânticas

Fluxo está associado ao transporte de energia e é o parâmetro utilizado para mensuração da potência radiante emitida por uma fonte luminosa. Na radiometria, o fluxo radiante é expresso em J/s ou Watts (W) e consiste na taxa de energia que atravessa uma superfície em um determinado tempo. No sistema quântico, o fluxo, assim como as demais grandezas nesse sistema, pode ser representado de duas maneiras distintas: pela resposta fotossintética das plantas através da curva RQE e pela PAR apenas, que considera de igual peso a eficiência fotossintética dos fótons (DA COSTA & CUELLO, 2004) (COSTA, 2006) (ALMEIDA, et al., 2014). As duas formas de interpretação são ilustradas no espectro eletromagnético da Figura 1, na sessão 2.1.2.

Dessa forma, o fluxo equivalente do sistema quântico pode assumir duas ponderações com considerações conceituais distintas de medição: o fluxo fótico fotossintético (PPF, *Photosynthetic Photon Flux*) e o fluxo fótico de produção (YPF, *Yield Photon Flux*), denominado método fitométrico. A unidade da PPF é dada em $\mu\text{mol/s}$ e considera os valores energéticos dos fótons iguais invariavelmente ao seu comprimento de onda. Além disso, a PPF é analisada apenas no intervalo espectral de 400-700 nm. Já o método fitométrico, também dado em $\mu\text{mol/s}$, considera um intervalo de análise entre 320-760 nm e a ponderação da energia fótica por comprimento de onda. Por essas considerações, pesquisas apontam que o método fitométrico é mais adequado para estimativa de quantificação de radiação ativa para as plantas (McCREE, 1972) (DA COSTA & CUELLO, 2004) (HOGEWONING, et al., 2012).

A quantidade de energia emitida por uma fonte radiante não é a mesma quantidade que incide na superfície em análise. A distância, a inclinação e o tamanho da superfície são parâmetros que influenciam na quantidade de energia incidente na mesma. Dessa forma, há outra grandeza de grande relevância nas análises fóticas, denominada

irradiância (sistema radiométrico). A irradiância indica a quantidade de energia radiante que incide em uma determinada superfície analisada. Sua unidade em SI (Sistema Internacional de Medidas) é dada em W/m^2 (COSTA, 2006).

No sistema quântico, a equivalência de irradiância pode assumir duas diferentes parametrizações, assim como o fluxo fotossintético já apresentado anteriormente: densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD, *Photosynthetically Photon Flux Density*) e densidade de fluxo de fótons incidentes de produção (YPPFD, *Yield Photon Flux Density*), que seguem às mesmas diferenciações apontadas para as grandezas de fluxo quântico, citadas anteriormente. PPFD e YPPFD são expressas pelas equações em (2.4) e (2.5), respectivamente (COSTA & CUELLO, 2013) (ALMEIDA, et al., 2014).

$$E_{q,PPFD} = \int_{400}^{700} R_q(\lambda) \cdot E_{e,\lambda} d\lambda$$

$$E_{q,PPFD} = \int_{400}^{700} \frac{\lambda}{N \cdot h \cdot c} \cdot E_{e,\lambda} d\lambda$$

$$E_{q,PPFD} = \frac{1}{0,1196} \int_{400}^{700} \lambda E_{e,\lambda} d\lambda \quad (2.4)$$

, em que $R_q(\lambda)$ é a conversão da radiação em forma de energia, em Watts, para quântica, em mols de fótons. $E_{e,\lambda}$ é a densidade de fluxo radiante, $E_{q,PPFD}$ é a densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativo e N é a constante de Avogrado ($6,02 \cdot 10^{23}$ fótons/mol).

$$E_{q,YPPFD} = 8,3612 \int_{360}^{760} \lambda \cdot E_{e,\lambda} \cdot P(\lambda) d\lambda, \text{ ou,}$$

$$E_{q,YPPFD} = 8,3612 \sum_{360}^{760} \lambda \cdot E_{e,\lambda} \cdot P(\lambda) \Delta\lambda \quad (2.5)$$

, em que $P(\lambda)$ é a curva de representação da RQE das plantas e $E_{q,YPPFD}$ é a densidade de fluxo de fótons incidentes de produção.

Análogo a discussão apontada anteriormente, a grandeza YPPFD é mais adequada para quantificação da radiação fotossinteticamente ativa incidente nas plantas por ter mais considerações condizentes com o traço comportamental fisiológico das mesmas (HOGEWONING, et al., 2012).

2.3 Objeto de estudo – Lúpulo (*Humulus lupulus*)

Para atender aos objetivos do trabalho de cultivo indoor foi escolhido o lúpulo como objeto de estudo e experimentação, que foi submetido ao cultivo sob iluminação artificial.

2.3.1 Revisão Bibliográfica sobre a planta

O lúpulo é uma planta herbácea, trepadeira e perene, pertencente à família *Cannabaceae* e cultivada desde a idade média com o propósito de aplicação na fabricação de cerveja. Seus cones (estróbilos) contém uma resina chamada lupulina. A lupulina é composta por vários ácidos e óleos que são ingredientes essenciais no processo de aromatização e amargor da cerveja (PEARSON, et al., 2016). Atualmente, a concentração de um ácido específico denominado iso- α é o principal indicativo para análise de produção no cultivo de lúpulo (PRENCIPE, et al., 2014). A concentração desse componente é extremamente dependente do cultivar utilizado, das condições ecológicas externas, do cultivo, da técnica de extração e da estocagem (BARTH, et al., 1994).

O lúpulo é originário de zonas temperadas de alta latitude do hemisfério Norte, apresentando melhores respostas de crescimento e produção em regiões entre as latitudes de 35° a 50° do hemisfério norte e sul (KNEEN, 2003). Portanto, o sucesso no cultivo da planta depende largamente de uma emulação próxima dos fatores abióticos presentes em seu habitat natural, com destaque para a temperatura, radiação (em intensidade e duração), irrigação e nutrientes do solo (PINHO, 2008).

Nesse contexto, a escolha do lúpulo como objeto de estudo deste trabalho se justifica pelas seguintes razões:

- Elevado viés industrial nacional devido à alta demanda na importação de lúpulo para atender o mercado brasileiro cervejeiro em constante crescimento;
- Aumento do interesse pela fabricação e consumo de cerveja artesanal por pequenos produtores;
- Aporte de empresas de pesquisa para o cultivo de lúpulo no Brasil;

- A dificuldade do cultivo da planta por conta de regimes abióticos notavelmente diferentes dos encontrados em seu habitat natural (viabilizando estudos com cultivo indoor);
- Possibilidade de controle e indução de maior número de produções ao ano através de emulação de ciclos em períodos menores que 365 dias (VARGA, 2017);
- Pesquisas liberadas devido à inexistência de patentes de diversos cultivares (Chihook, Magnum, Cascade, etc) (IHGC, 2016);
- Caráter inovador do trabalho com auxílio de iluminação artificial, o que potencializa a contribuição científica para a área de horticultura.

Deve-se destacar as dificuldades encontradas para execução do trabalho dos experimentos e estudo com o lúpulo, que são:

- Bibliografia escassa para estudos com o lúpulo e com radiação;
- Elevado preço do material biológico (mudas e sementes) devido à alta demanda nacional atual;
- Inexperiência com as técnicas de cultivo por parte dos pesquisadores envolvidos no trabalho (NIMO e Fisiologia Vegetal da UFJF);
- Alta susceptibilidade a pragas, ao estresse por radiação e as chuvas excessivas na região de cultivo (Juiz de Fora).

2.3.2 Experimentos iniciais com a planta

Foram adquiridos inicialmente nove mudas clones de lúpulo fêmeas para os testes iniciais e de adaptação das estruturas do laboratório para o cultivo das plantas, assim como para a observação por testes empíricos do crescimento vegetativo, nutrição, adequação em ambientes com diferentes exposições a radiação e regimes de irrigação. Além disso, para efeito de dimensionamento da luminária do projeto, avaliou-se o comportamento das plantas especificamente quanto à demanda de YPFD instantânea e diária, por meio do experimento da curva de densidade de fluxo.

Nesse experimento, as plantas analisadas foram submetidas a dois cenários de irradiância/YPFD diferenciados entre o mês de janeiro e fevereiro de 2018. O cenário 1 corresponde à parte externa do Departamento de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

da Universidade Federal de Juiz de Fora, área exposta a pleno Sol e próxima às instalações do laboratório NIMO. Enquanto que o cenário 2 refere-se a região intermediária da sala de crescimento do Laboratório de Fisiologia Vegetal com uma atenuação de 60% da radiação solar plena decorrente do revestimento estrutural da sala de crescimento. Ambos os grupos permaneceram pelo período de aproximadamente três meses de adaptação e monitoramento da irradiância média e máxima local antes de serem submetidos a análises da fotossíntese empregando um analisador de gases no infravermelho (IRGA) LI6400XT da LI-COR (LICOR CO., 2015). Os testes com o IRGA consistiram na aquisição de taxa de assimilação de CO₂ em resposta ao aumento de PPFD nas folhas, variando entre 0-2000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$.

Os valores de irradiância e YFPD para o cenário 1 foram obtidos pela estação meteorológica do Laboratório de Climatologia e Análise Ambiental do Departamento de Geociência da UFJF no mês de março do ano de 2017 (INMET, 2017). Já a aquisição da irradiância do cenário 2 foi obtida com o uso do difusor cossenoidal modelo CC-3, espectrômetro CDS610 e fibra ótica OC-05057. Os dados obtidos foram comparados com a aquisição feita para o Cenário 1, de modo que foi encontrado um termo de atenuação empírico equivalente para o cenário 2. Os valores das irradiâncias e das YFPDs de ambos os cenários, assim com as tendências médias anuais para os meses referentes à aquisição para o Cenário 1 e para latitude de 42 graus (cenário de radiação ideal para desenvolvimento do lúpulo) foi registrado na Tabela 1 (ALBRIGHT, et al., 2000) (HIERONYMUS, 2012).

Tabela 1. Valores fotoperíodo e de radiação incidente nas plantas e fotoperíodo para os dois cenários listados.

Ambiente	Fotoperíodo (horas)	Irradiância média (W/m ²)			YFPD ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$)	
		Média	máxima mensal	Total diário	Média	Máxima mensal
Cenário 1 (INMET, 2017)	12,23	439,6	740,1	5275,3	2009,0	3382,4
Cenário 2	12,23	-	-	-	807	1359
Tendência anual para Cenário 1 (INMET, 2017)	12	365,9	648,3	4485,2	1672,2	2962,7
Tendência anual para latitude 42°	12	-	-	-	499	674

As curvas de respostas ao aumento de YFPD da folha de lúpulo são referentes ao aproveitamento da radiação (rendimento expresso em F_v'/F_m') e produção fotossintética para cada cenário. Essas curvas são mostradas nas Figuras 7a) e 7b), respectivamente para o cenário 1 e 2. Observou-se queda na eficiência fotoquímica com o aumento de PPFD

nas folhas e que, em relação à produção fotossintética, as plantas apresentam as mesmas etapas mostradas na Figura 4.

Pela comparação entre as Figura 7a) e 7b) percebe-se variações nas curvas médias de produção fotossintética e de eficiência fotoquímica aparente devido à ação de alterações morfológicas observadas nas plantas submetidas a radiações médias diferenciadas para cada cenário. Logo, conclui-se que o ponto ótimo de máxima eficácia do sistema luminária/planta é variável em função da radiação média, conforme apontado por BJÖRKMAN e DEMMIG (1987). Para análises futuras de fluxo YPF ótimo emitido pela luminária, este experimento precisa ser refeito para plantas de lúpulo, visando análises em cenários de radiação média tangíveis para serem alcançados por iluminação artificial.

Outro experimento realizado foi o de caracterização do espectro de absorção dos pigmentos fotossintéticos das folhas de lúpulo. O experimento foi executado no laboratório de fisiologia vegetal da Universidade Federal de Juiz de Fora (FV-UFJF) com o intuito de analisar a curva de absorbância e compará-la com a de outras espécies encontradas na bibliografia.

A obtenção dos dados de absorbância foi feita após a maceração das amostras de folhas de lúpulo em solução de acetona 80%. Posteriormente, os extratos foram submetidos a um espectrofotômetro (FEMTO modelo 700 S) e mediu-se a parcela da radiação absorvida pelos pigmentos em teste. Por fim, foi estabelecida uma relação linearmente proporcional em massa por amostra e uma média entre três aquisições de absorbância retiradas de três folhas das plantas em mesmo estágio de desenvolvimento.

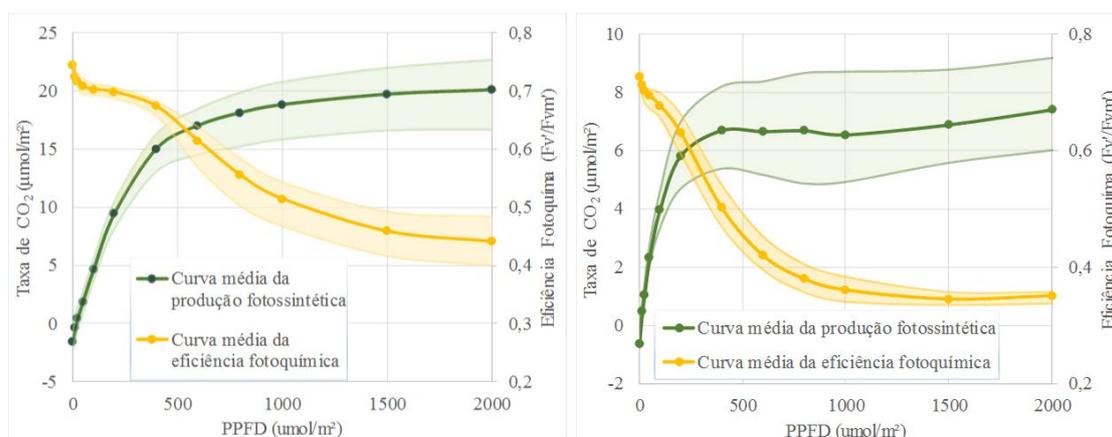


Figura 7. Faixas de resposta fotossintética e de rendimento fotoquímico (Fv'/Fm') com regiões de máxima e mínima e linha média de aquisição em função da fixação de CO₂ para: a) Cenário 1 e b) Cenário 2.

O resultado da análise é encontrado na Figura 8, onde se é possível a comparação com curvas de absorvância disponíveis na literatura (PINHO, 2008), assim como os espectros de emissão dos LEDs elegidos para compor a luminária de projeto: azul (LED B) e vermelho (LED R) da série OSOLON SSL 120 (OSRAM Opto Semiconductors, 2016a) (OSRAM Opto Semiconductors, 2016b).

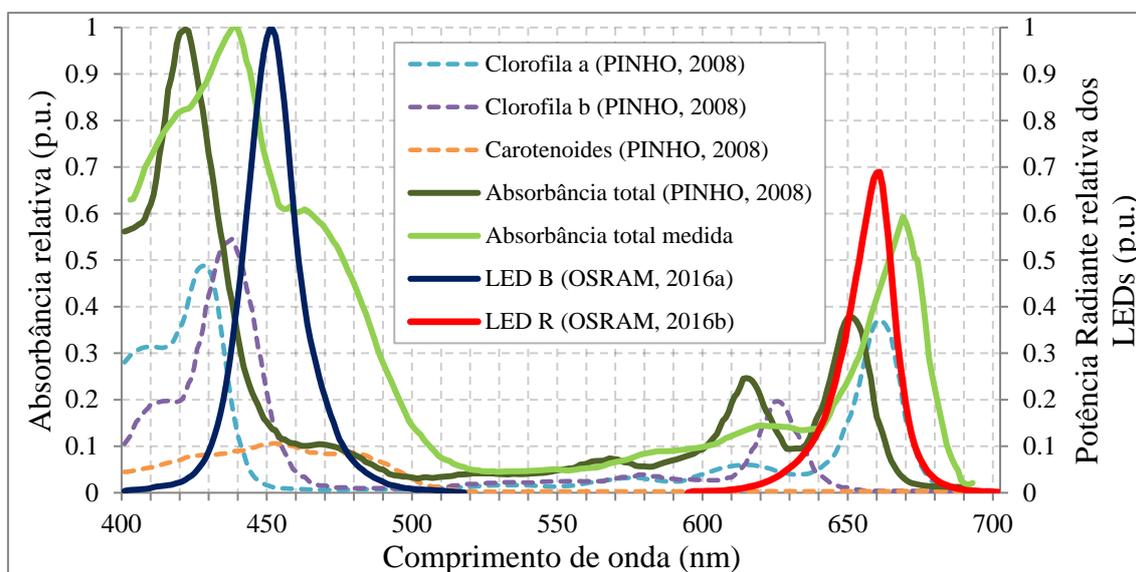


Figura 8. Curvas de absorvância das clorofilas *a*, *b* e dos carotenoides, comparação entre as curvas de absorvância total encontradas em literatura e a medida em laboratório para folha de lúpulo e espectro de emissão dos modelos de LEDs escolhidos para o projeto de luminária.

2.4 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo de contextualização foram apresentados os principais comportamentos e fenômenos que ocorrem nas plantas submetidas à radiação com ênfase nos estudos relacionados ao fotoperíodo, espectro eletromagnético e intensidade radiante pela ótica vegetal. Por meio da revisão bibliográfica, observou-se que todos os três aspectos têm grande influência no desenvolvimento e na produtividade das plantas e, portanto, devem ser considerados no desenvolvimento da luminária e no seu respectivo circuito de acionamento, dentro das condições de viabilidade do projeto. O fotoperíodo deve ser ajustável para emular a época do ano, auxiliar no crescimento da planta (no estágio vegetativo) e induzir floração, aumentando a produtividade. A luminária artificial deve atender, ao menos, ao intervalo de espectro dentro da região de 420-470 nm e 600-700 nm para suprir as necessidades fisiológicas das plantas, além de emitir radiação na

região de maior eficiência quântica da mesma, o que garante maior aproveitamento energético do sistema luminária/planta. Em adição, a curva de produção fotossintética em resposta ao aumento da densidade de fluxo YPPFD deve ser usada como referencial de dimensionamento das luminárias de modo que a mesma opere com YPPFD próximo a região ótima. Isto garante uma alta taxa de produção e um aproveitamento máximo fluxo YPF de operação da luminária.

O capítulo também tratou dos sistemas de medições e das grandezas relacionadas à radiometria e à quântica, considerando a dualidade onda/partícula da radiação. Nesta sessão, pôde-se concluir que o sistema fitométrico é o mais adequado para ser utilizado nas aferições feitas neste trabalho, pois o mesmo considera fatores mais condizentes com a resposta fotossintética das plantas, como um maior intervalo de espectro compreendendo em totalidade a região do espectro fotossintético ativo e ponderação dos níveis energéticos diferenciados em função do comprimento de onda dos fótons.

Por fim, foi feito um detalhamento do objeto de estudo (lúpulo) descrevendo as principais características descritas na literatura, assim como as duas rotinas de experimentação realizadas para a comprovação empírica de demanda radiante da planta e picos de eficiência de absorção que foram usados como referência para escolha dos modelos de LEDs no desenvolvimento do projeto da luminária, a ser detalhado no próximo capítulo.

3. Iluminação artificial no cultivo de plantas: projeto de luminária

Atualmente, o mercado de iluminação artificial voltado ao cultivo de plantas tem crescido expressivamente devido ao aumento do potencial de luminárias modernas no que se refere ao alcance de taxas elevadas de YPFD a custos viáveis de fabricação e de consumo de energia elétrica. Neste contexto, o mercado de iluminação em horticultura alcançou 690 milhões de dólares em 2016, sendo contabilizados 193 milhões desses apenas em investimentos de luminárias LED. O prognóstico de crescimento para o mercado foi de 1,424 bilhões de dólares, com crescimento de 35% no mercado estadunidense e 15% no mercado chinês para 2017 (LEDINSIDE, 2017).

A iluminação artificial é utilizada tanto para suplementação, quanto para atendimento integral de radiação necessária no cultivo de plantas em salas de crescimento. Ela visa estimular a fotossíntese, crescimento vegetativo, a floração e produção de frutos, como já mencionado no capítulo anterior. Para desempenhar tais funções, é importante que a luminária cumpra os seguintes requisitos:

- Ajuste adequado da distância entre o dossel da planta e luminária;
- Controle de fotoperíodo em sincronia com a dinâmica da radiação solar diária (no caso de suplementação);
- Fornecer YPFD requerido para atender as taxas fotossintéticas adequadas e um espectro eletromagnético condizente com a absorção e a necessidade fisiológica das plantas.

Este capítulo apresenta uma breve revisão relacionada aos tipos de iluminação e as suas características principais voltadas à horticultura, explicando a razão para a escolha do tipo de iluminação e para o modelo de LEDs escolhidos para o projeto. Em seguida é apresentado o projeto de uma luminária adequada a demanda fotossintética de uma planta de lúpulo adulta com a abordagem em sua arquitetura, o arranjo dos LEDs e a modelagem

foto-eleto-térmica ou PET (*photo-electro-thermal*). Ao final do capítulo são apresentados os testes radiométricos e térmicos conduzidos com as luminárias prototipadas para comparação com resultados esperados pela modelagem. Estes testes foram realizados para a validação do modelo foto-eleto-térmico proposto e dos cálculos preditivos de YPFD pela metodologia adotada.

3.1 Tipos de iluminação aplicadas em horticultura

Ao longo da evolução do desenvolvimento das luminárias, diversos testes foram feitos em diferentes espécies de plantas envolvendo luminárias de incandescência, de descarga e, mais recentemente, com diodos emissores de luz (LEDs).

As luminárias de incandescência têm tido seu uso bastante limitado neste meio devido ao fato de terem baixa vida útil e baixa eficiência fótica (9-12%) gerando muito calor e podendo causar danos ao tecido foliar das plantas (PINHO, 2008). Devido a isso, elas precisam ser posicionadas mais distantes das plantas, o que acarreta em valores baixos de YPFD incidente no dossel da mesma, já que a irradiância em um sistema varia inversamente com o quadrado da distância pela Lei de Lambert (SIMONS & BEAN, 2001). Modelos de fontes incandescentes ainda são aplicadas em casos raros para horticultura como as lâmpadas de xenônio, que apresentam um elevado fluxo radiante e alto consumo elétrico, sendo efetivas para abastecer as plantas com altas densidades de fluxo, mesmo posicionadas longe do dossel.

O grupo das lâmpadas de descarga, apesar de estarem em crescente desuso, são mais aplicadas que as lâmpadas incandescentes na horticultura. Essas lâmpadas apresentam vida útil mais elevada e, dependendo do modelo, apresentam espectro eletromagnético mais atrativo para o cultivo de plantas (mesmo apresentando excessos em determinados intervalos do espectro) (PINHO, 2008). Exemplos de lâmpadas desse grupo aplicadas na horticultura são as fluorescentes, de vapor metálico e de vapor de sódio (baixa e alta pressão).

As lâmpadas fluorescentes mais utilizadas para tais fins são as tubulares por proporcionar em distribuição de radiação mais uniforme sob a superfície plantada. Sua eficiência fótica está entre 20-30%, tendo 90% da sua emissão concentrada na região PAR. As lâmpadas de vapor metálico geralmente podem ser encontradas em modelos

com fluxo superior aos das lâmpadas fluorescentes e sua inclusão de halogeneto metálico proporciona espectro mais efetivo às plantas. Seu tempo de vida varia entre 6000-20000 horas enquanto que sua porcentagem de radiação azul emitida alcança taxas de 20% (adequadas às necessidades fisiológicas das plantas) (MURDOCH, 1985) (PINHO, 2008).

As lâmpadas do tipo sódio em alta pressão (HPS, *high-pressure-sodium*) foram, por muito tempo, a fonte radiante mais apropriada nas aplicações com horticultura. Isto devido seu baixo custo, alta emissão de fluxo radiante, distribuição espectral concentrada quase que em totalidade no intervalo PAR, longa vida útil (10000-24000 horas) e eficiência fótica elevada (30%-40%) (S.SIMPSON, 2003) (PINHO, 2008).

Recentemente, as luminárias a LED dominam o mercado de horticultura, pois superam a atratividade das tradicionais HPS devido sua maior vida útil (50000 horas), robustez, tamanho reduzido, emissão de radiação direcionada (devido aspectos de fabricação e encapsulamento) e, principalmente, pela elevada eficiência fótica e eficácia em YPF (PINHO, 2008) (PHILIPS LIGHTING, 2015). Essa maior eficiência se deve ao recurso de ajuste do espectro eletromagnético da luminária, o que é possível por meio da combinação de um arranjo discreto de diferentes elementos de LEDs e com emissão em intervalos de espectro variados. Suas desvantagens em aplicação concentram-se no elevado custo e limitações de modelos disponíveis em mercado. Apesar disso, os custos dessa tecnologia vêm apresentando um decréscimo significativo e contínuo ao longo do tempo, como mostrado na Figura 9. Isso é decorrente do aumento do mercado de produção (Figura 10), o que também influi no melhoramento tecnológico, na maior eficiência de produção e no aumento da disponibilidade de modelos diversificados de LEDs fabricados.

Outra análise pertinente a se fazer para escolha da luminária é sua viabilidade por eficácia (fluxo fotossintético gerado por potência elétrica) e viabilidade econômica (fluxo fotossintético gerado em relação ao custo de aquisição da luminária). A Tabela 2 compara as três principais fontes de iluminação artificial aplicadas ao cultivo de plantas (HPS, fluorescente tubular e LED) em termos de viabilidade econômica.

A carga fluorescente possui um custo mediano de capital investido por fluxo YPF gerado para um e cinco anos. Para os tipos de HPS testados obteve-se resultados semelhantes, porém, com o menor custo por fluxo gerado para um e cinco anos dentre os modelos analisados. Os três tipos de luminárias a LED comparadas apresentaram

diferenças consideráveis entre custos por fluxo. Essas diferenças são resultado do padrão característico das a curva RQE das plantas de maior eficácia fotossintética na região espectral do vermelho e azul (Figura 1). Sendo assim, a radiação emitida nas demais

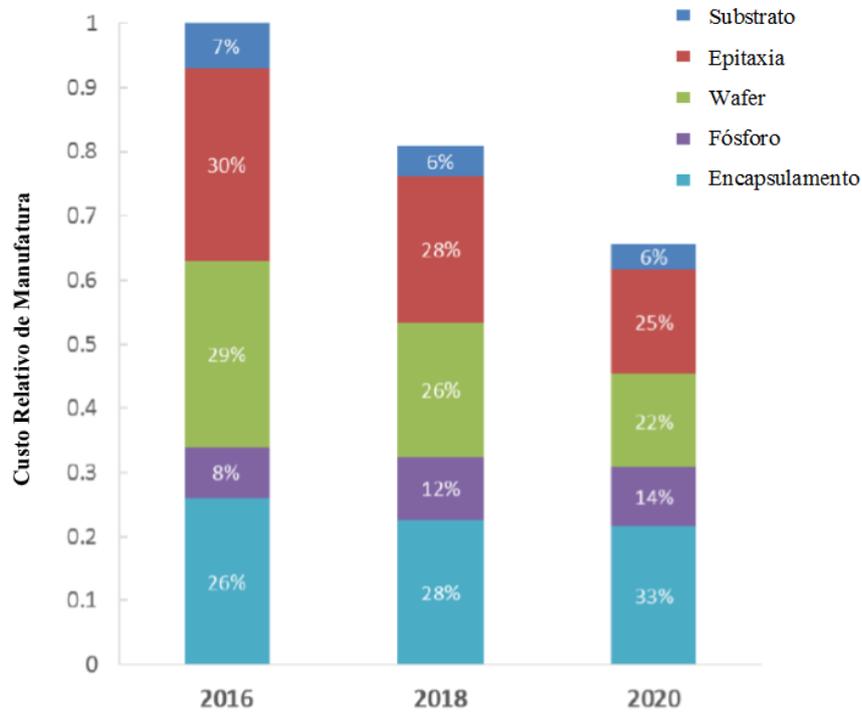


Figura 9. Prognóstico do custo de LEDs por elementos de fabricação. Figura adaptada (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2016).

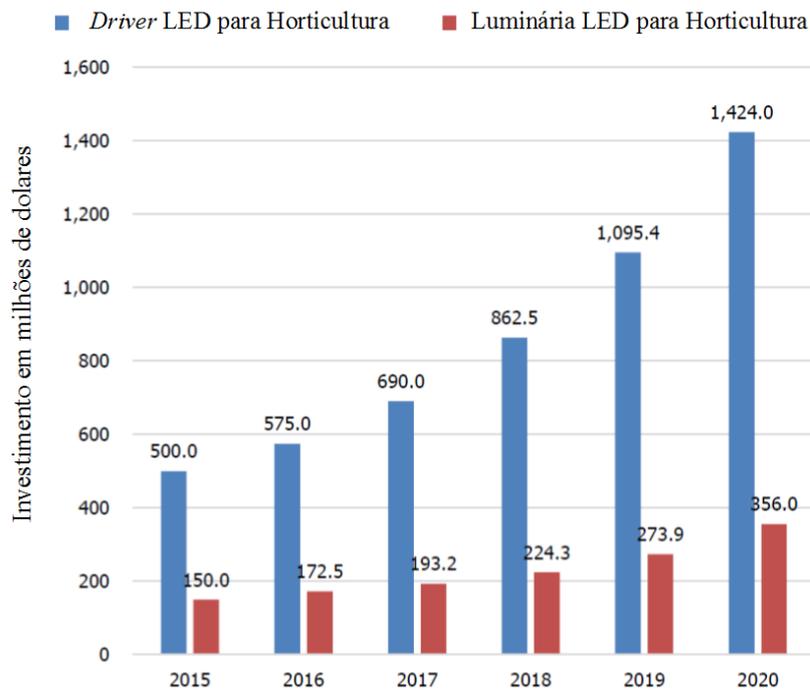


Figura 10. Tendência de crescimento do mercado global de LEDs para aplicação em horticultura. Figura adaptada (LEDINSIDE, 2017).

Tabela 2. Comparação da viabilidade econômica para lâmpadas HPS, LED e fluorescente (NELSON & BUGBEE, 2014).

Tipo de Lâmpada	Potência elétrica	YPF ($\mu\text{mol/s}$)	Eficácia ($\mu\text{mol/KWh}$)	Custo de aquisição para 1 $\mu\text{mol/s}$ (\$)	Análise de custo em 5 anos (\$/ano. $\mu\text{mol/s}$)
Fluorescente T8	58	48	830,8	0,83	0,51
HPS 400W reator magnético	443	416	480	0,48	0,4
HPS 1000W reator magnético	1004	1161	301	0,4	0,31
HPS 1000W reator eletrônico	1024	1334	285	0,29	0,28
LED a. vermelho/branco	423	378	3432	3,44	1,01
LED a. vermelho/branco/azul	304	304	2560	2,56	0,73
LED arranjo vermelho/azul	384	384	1836	1,84	0,54

regiões espectrais pelo LED branco não são aproveitadas em plenitude para o processo fotossintético. Apesar dos altos valores de investimento inicial em luminárias LED, como a luminária vermelho/azul emite restritamente nas regiões de maior absorção e eficácia fotossintética das plantas, o custo por fluxo gerado não é tão elevado se comparado com os demais modelos da tabela. Considerando a pesquisa feita em 2014 e as significativas melhoras na eficiência e diminuição de custos dos LEDs (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2016) (LEDINSIDE, 2017), a opção por LEDs vermelho/azul se mostra como arranjo mais atraente para implementação no presente projeto.

Considerando a escolha pelo arranjo vermelho/azul, se optou pelos LEDs da família OLSON SSL 120 de modelos GH CSSPM1.24 (vermelho com pico em 660 nm) e GD CSSPM1.14 (azul com pico em 451 nm) da empresa OSRAM pelo seu baixo custo, facilitação de soldagem em placa, robustez e eficácia quântica elevada (OSRAM Opto Semiconductors, 2016a) (OSRAM Opto Semiconductors, 2016b).

3.2 Projeto da luminária

Para o projeto da luminária adotou-se a seguinte metodologia de desenvolvimento:

- Apresentação dos métodos sugeridos para aquisição de YPF ótimo de produção fotossintética da planta;
- Cálculos radiométricos e conversão do fluxo para sistema quântico em função do YPF requerido pela planta;
- Aquisição de modelos de LEDs atentando para os picos de maior eficiência para as plantas e aos requisitos de viabilidade econômica e

técnica (custo por unidade, eficiência fótica, robustez, facilidade de soldagem e área efetiva de dissipação de calor);

- Proposição da topologia de luminária quanto à quantidade de LEDs, proporção entre modelo vermelho/azul e disposição dos mesmos na placa visando fluxo fótico necessário, otimização da dissipação de calor e uniformidade de fluxo e espectro;
- Modelagem foto-eleto-térmica do sistema;
- Anexação de sistema de dissipação de calor (utilização de *Metal Core*, com dimensionamento do dissipador e layout das placas com dissipação por ilhas de cobre e ventilação forçada);
- Testes radiométricos e térmicos do protótipo para validação da estimativa de densidade de fluxo, proporção espectral e modelagem foto-eleto-térmica.

3.2.1 Estimativa radiométrica e quântica

O projeto radiométrico de uma câmara *indoor* foi desenvolvido por meio da estimativa do fluxo necessário da luminária para atender o desempenho fotossintético esperado das plantas de lúpulo. O desempenho é estimado a partir dos dados de estresse de YPFD específico da espécie. As curvas de produção fotossintética por densidade de fluxo para o lúpulo podem ser observadas nas Figuras 7a e 7b, referentes a dois cenários de exposição à radiação solar.

Sendo assim, a estimativa do fluxo da luminária envolve um conjunto de variáveis que formam o escopo da problemática do projeto: abastecimento de radiação complementar ou integral, distribuição e proporção espectral, YPFD ótimo de produção fotossintética da espécie em questão e temperatura do sistema.

3.2.1.1 Estimativa de densidade de fluxo YPFD requerido

Primeiramente, deve-se levar em consideração se o sistema será utilizado para suplementação de radiação complementar ou integral para as plantas, ou seja, se o ambiente terá auxílio de radiação solar diária ou se o mesmo estará em ambiente confinado (câmara escura). Para este trabalho, elegeu-se um cenário em câmara escura

para facilitar as análises de respostas das plantas, isolando-as da suscetibilidade a variações da radiação solar diária e demais fatores ecológicos do meio externo. Portanto, a luminária deve atender de forma plena a demanda fotossintética de uma planta de lúpulo adulta com uma radiação necessária para seu desenvolvimento (crescimento e floração). Este trabalho aborda três propostas de aquisição do parâmetro de YPFD para projeto.

Um primeiro método de estimativa de YPFD teve como base as latitudes de maior efetividade de cultivo e produção do lúpulo (Hieronymus, 2012) (PEARSON, et al., 2016), entre 40° e 50°. Pode-se utilizar de YPFD característico do habitat natural da planta como referência para dimensionamento da luminária. A mesma deve ser dimensionada para o mês com maior YPFD e dimerizada para os demais meses com YPFD inferior. Uma alternativa de operacionalização simplificada do método seria trabalhar apenas com dois cenários semestrais diferentes: para fotoperíodos curtos e longos, com menor e maior energia radiante média diária, respectivamente (verão e inverno).

A Figura 11 ilustra o primeiro método aplicado com base nos valores de PPFD médios diários datados por um histórico de medições de quatorze anos consecutivos em latitude ótima de crescimento de lúpulo (Ithaca, Nova Iorque – latitude 42°) (ALBRIGHT, et al., 2000). A Figura 11 também apresenta em tons de azul a integralização diária (I.D.) de densidade de fluxo quântico com relação a quatro condições diferentes de céu. Esses valores foram convertidos para um valor instantâneo de média instantânea (M.I.), através do fotoperíodo mensal para latitude 42°, em valor PPFD máximo de 751,6 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ no

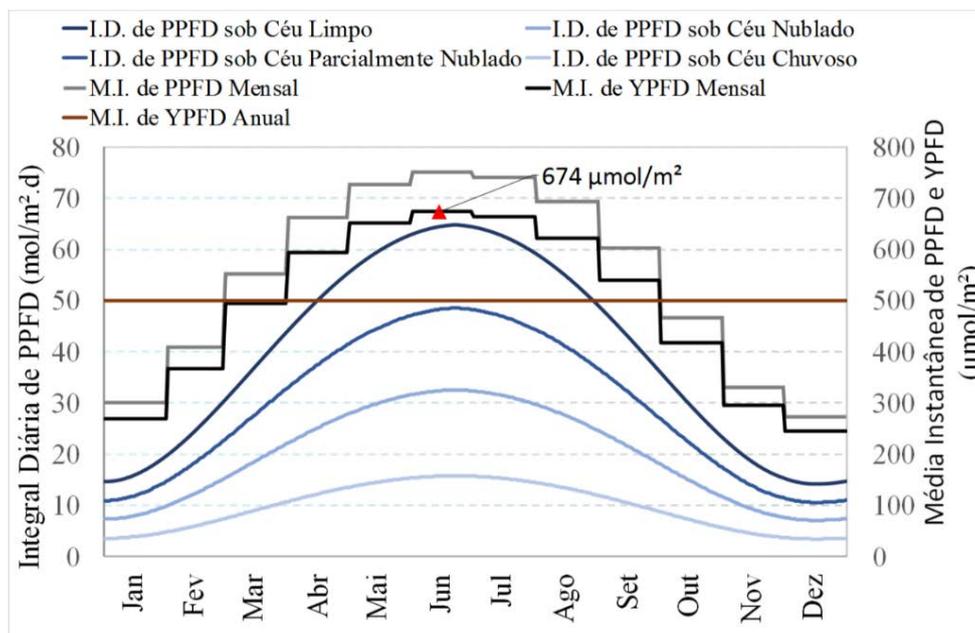


Figura 11. Variação anual de radiação solar integral diária e mensal para latitude de 42°.

mês de Junho e convertido para YPFD por meio da equação (2.5). Como discutido na sessão 2.2.2 e corroborado por TAVARES, et al. (2018a), o método fitométrico apresenta maior adequação ao contexto de mensuração da radiação ativa para o processo de fotossíntese. Dessa forma, pelo conhecimento do espectro eletromagnético solar incidente na Terra (G03 COMMITTEE, 2012), tem-se pela equação (2.5) a conversão da densidade de fluxo PPF para o equivalente fitométrico de YPFD máximo de $674 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ que a câmara deve desempenhar no mês de Junho, por um período diário de 15 horas e 20 minutos, aproximadamente.

O segundo método proposto para estipular YPFD apresenta maior exatidão, porém, maior complexidade de execução. Nesse método a planta deve estar submetida a um ambiente com regime de irradiação solar condizente com o habitat natural da espécie, constituindo o Cenário 1. Isto pode ser alcançado com um revestimento atenuador (sombrite) em uma sala de crescimento, caso os níveis de radiação solar local sejam mais elevados que o referencial de radiação desejado. Após um tempo variável de exposição, dependendo da espécie, a planta gera folhas adaptadas àquele regime de YPFD específico do local (TAIZ et al., 2014). Com o equipamento IRGA, se realiza a estimativa não destrutiva conforme já descrito na sessão 2.3.2 para a obtenção do YPFD ótimo. O ponto ótimo representa a maior taxa fotossintética em resposta à menor YPFD requerida. Indiretamente, isso significa uma maior quantidade de produção fotossintética da planta em resposta a uma menor potência elétrica demandada pela luminária (Figura 12).

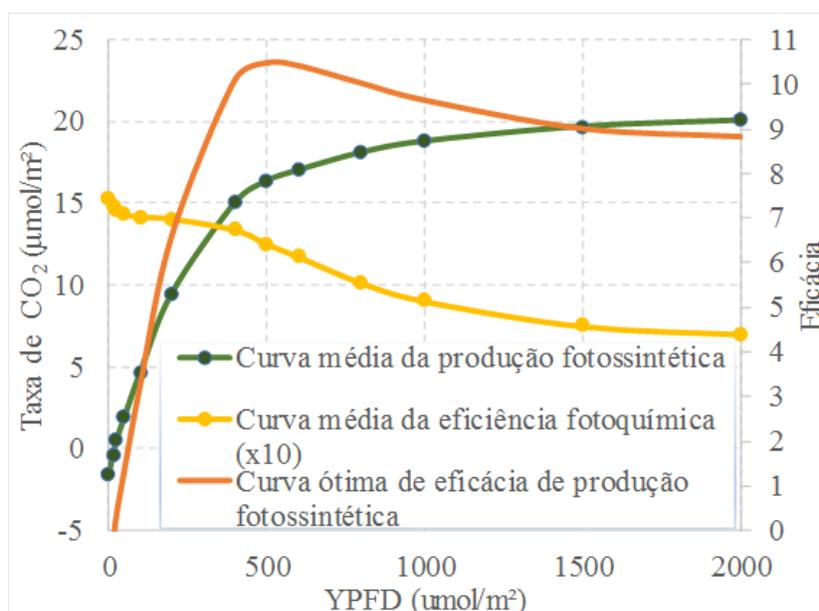


Figura 12. Ponto ótimo de produção fotossintética por YPFD demandado pela luminária prototipada.

A planta então é submetida exclusivamente a luminária projetada, com valor de YPFD ótimo determinado com o uso do IRGA e um fotoperíodo condizente com o do seu habitat natural. Isso compõe o segundo cenário de exposição (sob iluminação artificial integral com nível de YPFD encontrado do cenário 1). Após o crescimento e maturação de novas folhas sob o ambiente do cenário 2, se faz novamente a análise com o IRGA para obtenção de uma segunda resposta de produção fotossintética referente ao novo ambiente de YPFD médio. Por fim, o reajuste de YPFD ótimo é feito por meio da dimerização da luminária projetada para formar o terceiro e último cenário de radiação para a planta.

O segundo método leva em consideração as alterações morfológicas da planta como agente de alteração da faixa de operação ótima de maior eficácia do sistema luminária/ planta por meio da alteração de eficiência fotoquímica. A Figura 13 mostra um fluxograma ilustrado para sintetizar o segundo método proposto.

O primeiro método apresentado enfatiza os resultados encontrados para o regime radiante em que se quer emular com diferenciação de YPFD mensal, porém, sem considerar a necessidade fótica real da planta para o seu desempenho em ponto fotossintético ótimo por densidade de fluxo demandado.

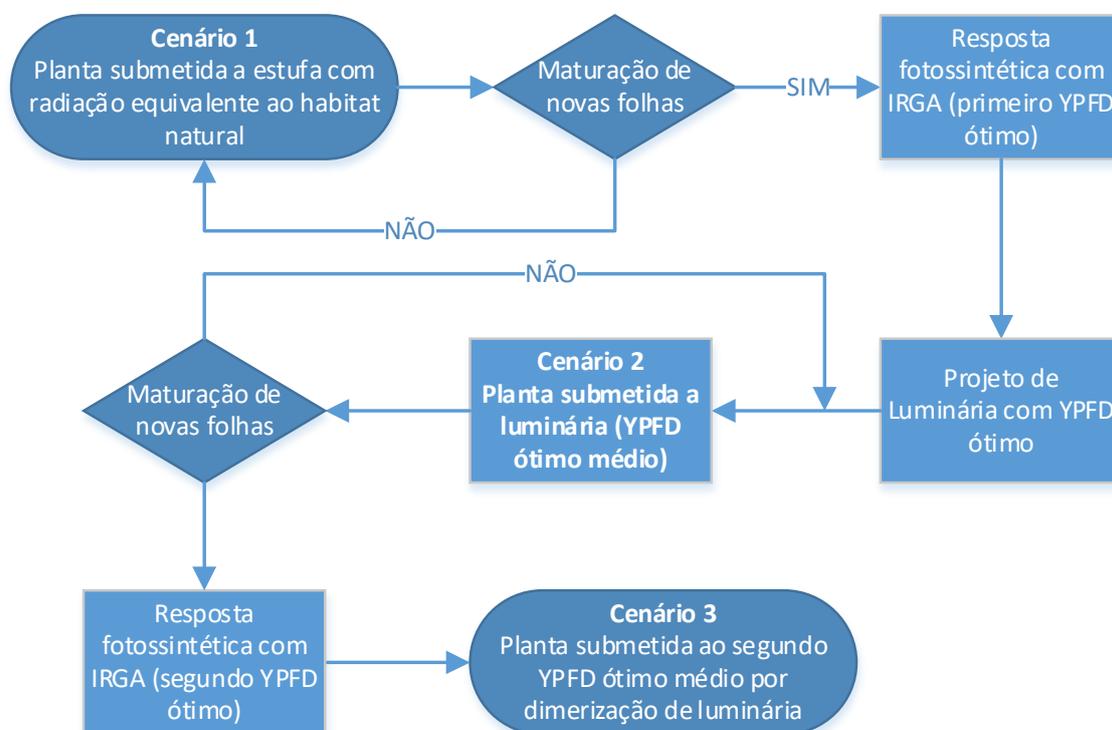


Figura 13. Fluxograma da segunda metodologia aplicada para estimativa de YPFD do projeto.

Por sua vez, o segundo método detém maior complexidade de implementação e aborda a necessidade real da planta, desta vez, se atendo apenas à época do ano na qual foram realizadas as medições de curva de densidade de fluxo.

Diante das limitações de cada método apresentado, o trabalho propõe um terceiro método que reúne parte do primeiro e segundo métodos como complementares entre si. Como o segundo método resulta em um YPFD ótimo apenas para um mês específico de medidas, se faz uma ponderação da necessidade média de YPFD da planta relativa aos demais meses por meio do YPFD mensal extraído do primeiro método. Assim, pode-se ter um valor mais próximo da necessidade fotossintética real da planta de acordo com cada mês do ano.

É importante enfatizar que os três métodos propostos não possuem base bibliográfica pela mesma carecer de estudos conclusivos no âmbito de estimação de YPFD ótimo para as plantas (PINHO, 2008) (VAN STRATEN, et al., 2010) (GUPTA, 2017) (VAN IERSEL & GIANINO, 2017). Estudos propõem um sistema realimentado com monitorização em tempo real de fluorescência e ajuste fino do fluxo emitido pela luminária (TAKAYAMA, et al., 2009). Porém, apesar de eficiente, esse método apresenta alta complexidade experimental e inviabilidade para aplicação industrial.

A Tabela 3 explicita os valores de PPF e YPF mensais (pelo primeiro método), YPF ótimo para plantas de lúpulo no mês de março (pelo segundo método) e o encontrado pela ponderação de cada mês (terceiro método) para o Hemisfério Sul terrestre.

Tabela 3. Valores de YPF encontrados para os três métodos sugeridos.

Método (umol/m²)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1º em PPF	752	741	694	603	467	331	273	300	410	552	663	727
1º em YPF	674	664	622	540	418	297	245	269	367	495	594	651
2º (Março)	-	-	518	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3º	561	553	518	450	349	247	204	224	306	412	495	543

Os valores de YPF citados na bibliografia para plantas perenes variam entre 174 a 417 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ (PHILIPS LIGHTING, 2015), enquanto que, para lúpulo em sala de crescimento, foi registrada densidade de fluxo entre 86,3 e 704 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ anual, sob radiação solar e sem suplementação com iluminação artificial (PEARSON, et al., 2016). O valor destacado da Tabela 3 indica o maior valor de YPF encontrado pelo terceiro método aplicado, 561 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$, requerido sobre o dossel da planta ao longo dos dias do

mês de maior incidência de radiação solar do ano (Janeiro, no Hemisfério Sul). Esse valor pode ser alcançado por meio do projeto de uma sala de crescimento mantida sob iluminação artificial com os dados de distância do dossel a luminária, área do dossel, YPF e distribuição de intensidade radiante da luminária. A metodologia e cálculos adotados para a estimativa de YPF serão apresentados na subseção seguinte.

3.2.1.2 Estimativa de fluxo YPF para o sistema

Com o valor médio de YPF encontrado, obtêm-se o respectivo YPF exigido para a luminária em função da área do dossel e da respectiva distância na qual a mesma é posicionada em relação ao dossel da planta. O cálculo do fluxo YPF médio é expresso pela equação (3.1), considerando a luminária como uma fonte de radiação puntiforme e a área do dossel igual a área total irradiada (SIMONS & BEAN, 2001).

$$\Phi_{q,YPF} = E_{q,YPFD} \cdot \pi \cdot d^2 \quad (3.1)$$

, em que $\Phi_{q,YPF}$ é o fluxo de fótons incidentes de produção, $E_{q,YPFD}$ é a densidade de fluxo de fótons incidentes de produção e d é a distância entre a luminária até o centro do dossel da planta.

No entanto, a área do dossel é geralmente fixa, respeitando a arquitetura da própria planta ou o dimensionamento da estrutura de tutoração construída. No caso particular do lúpulo, foi estipulada uma área circular de aproximadamente 0,126 m², equivalente a um diâmetro de 40 cm. Sendo assim, não necessariamente a área do dossel compreende a totalidade da área irradiada e, conseqüentemente, não há uma relação trivial entre o fluxo e a densidade de fluxo em função da distância. É necessário considerar a integração da intensidade de fluxo da luminária nos cálculos, respeitando sua distribuição aproximadamente cossenoidal (para o caso de LEDs). A Figura 14 apresenta um exemplo de distribuição cossenoidal da intensidade de fluxo do LED azul de modelo GD CSSPM1.14 da OSRAM (OSRAM Opto Semiconductors, 2016a).

A equação (3.2) permite calcular a intensidade máxima da fonte de radiação ($I_{q,max}$), localizada ao centro do plano irradiado, por meio da relação entre o fluxo e a intensidade de fluxo respectiva a linha perpendicular central da luminária puntiforme ao plano (SIMONS & BEAN, 2001). Em seguida, pode-se obter a relação entre a intensidade

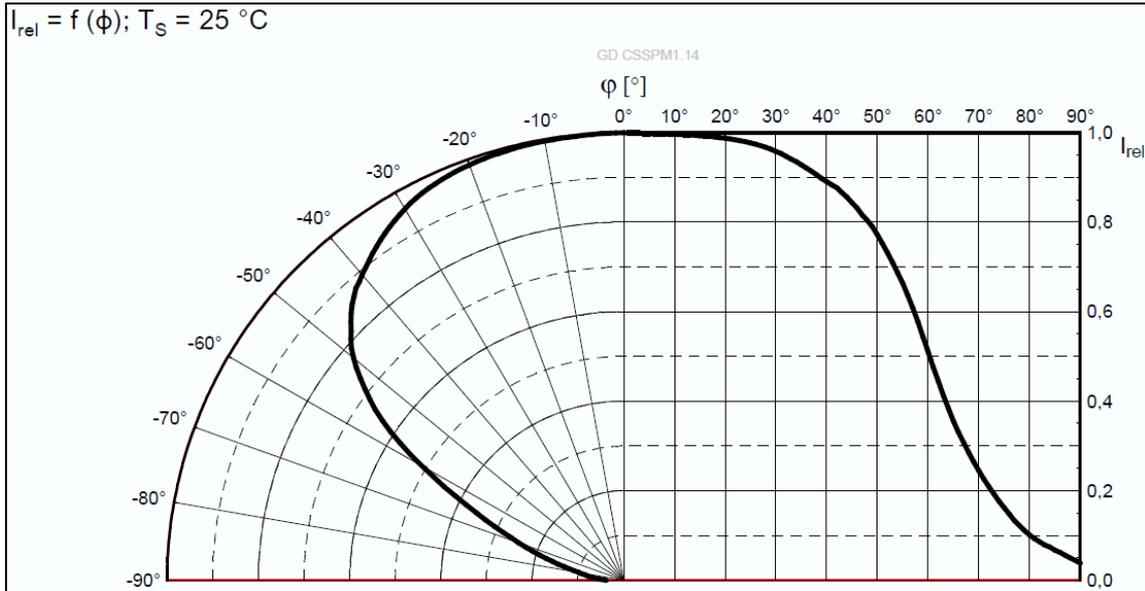


Figura 14. Distribuição de intensidade de fluxo do LED azul modelo CSSPM1.14 (OSRAM Opto Semiconductors, 2016a).

de fluxo e a densidade de fluxo na superfície pela equação (3.3) (PINHO, 2008):

$$I_{q,max} = \Phi_{q,YPF} / \Omega \quad (3.2)$$

$$E_{q,YPFD}(d) = \int_0^{\theta/2} \frac{I_{q,max}}{d^2} \cdot \cos\theta \cdot d\theta \quad (3.3)$$

Pela concepção de estado sólido (Figura 15), é necessário utilizar o método de Fator Zonal (*zone fator*, ZF) equação (3.4), que segmenta o plano de irradiação em zonas de ângulo sólido $\Delta\Omega$, suficientemente pequenos para considerar a região do disco projetada com uma intensidade de fluxo constante (SIMONS & BEAN, 2001). Com a variação da intensidade de fluxo sendo a média dos limites do ângulo do fator zonal, expressa pela equação (3.5), o fluxo total requerido da luminária puntiforme será o somatório da multiplicação dos fatores zonais de cada anel circular formado pela intensidade de fluxo médio daquela região, como mostrado na equação (3.6).

$$d\Omega = FZ(\theta_m, \theta_n) = 2\pi(\cos\theta_m - \cos\theta_n) \quad (3.4)$$

$$I_q(\theta) = I_{q,max} \cdot \cos\left(\frac{\theta_m + \theta_n}{2}\right) \quad (3.5)$$

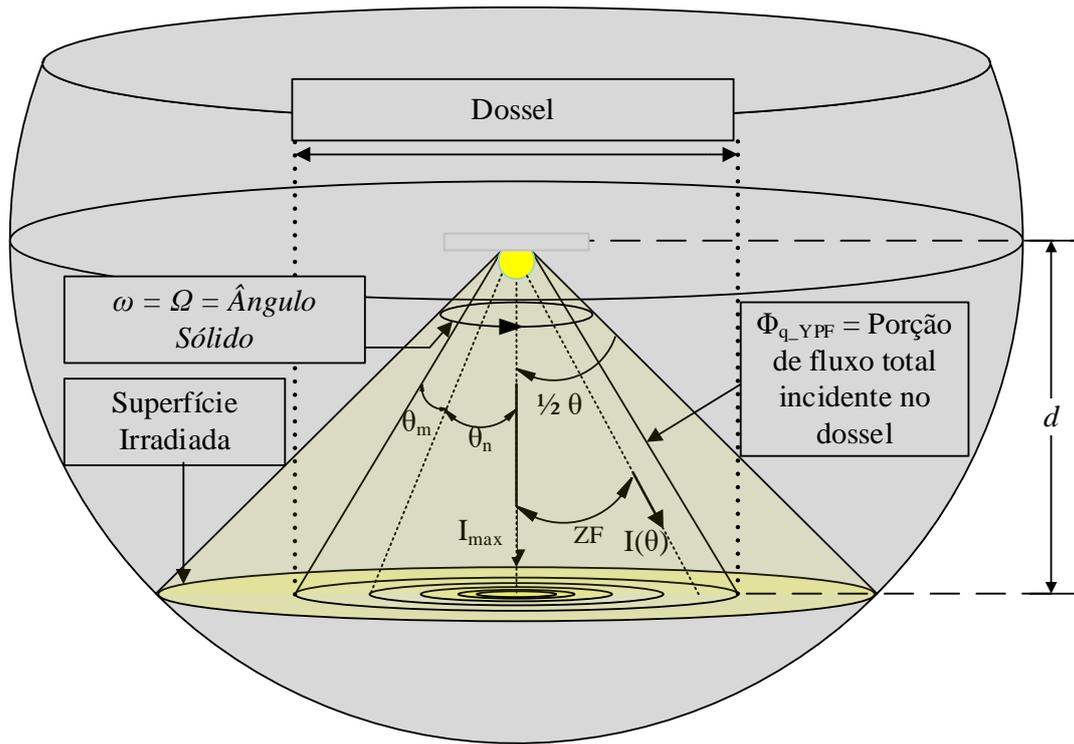


Figura 15. Interpretação geométrica tridimensional do sistema fótico composto pela luminária pontual e o dossel da planta.

$$\Phi_{q,YPF}(\theta) = \sum_0^{\theta/2} FZ \cdot I_q(\theta) \cdot \Delta\theta \quad (3.6)$$

O projeto da luminária adequada para o sistema deve levar em conta a distância mínima em que a temperatura radiada pela luminária não cause danos à planta, a distância mínima para consideração de fonte pontual e YPFD para o mês de maior radiação estipulado pelo método adotado (terceiro método proposto na subseção 3.2.1.1). Dessa forma, para os demais meses do ano, o respectivo YPFD pode ser alcançado apenas pela ação de dimerização de fluxo da luminária.

A luminária LED COB APOLLO 600 foi empregada nesse trabalho junto com a luminária prototipada no intuito de aplicação de uma fonte com caracterização simplificada devido a maior uniforme de distribuição de irradiância e espectro sobre a superfície, proximidade à característica de fonte de radiação pontual e alto fluxo, possibilitando grandes variações de distância entre a luminária e planta sem comprometer o fornecimento de radiação mínimo requerido pelas plantas. Pelo emprego do APOLLO 600, a temperatura incidente na superfície do dossel não sofre considerável incremento da temperatura atmosférica após 15 cm de distância entre a luminária e a superfície, como observado empiricamente. Logo, uma distância mínima de 20 cm poderia ser adotada

visando uma temperatura inferior a 30° na superfície foliar da planta em temperaturas ambientes inferiores a 25°C condicionadas na sala de crescimento.

De acordo com National Framework for Energy Efficiency (2009), a consideração pontual da fonte luminosa é válida apenas quando as dimensões do plano virtual de luz da luminária não superam cinco vezes a distância entre a mesma e a superfície irradiada. Pela folha de dados do COB, seu diâmetro é de 60 mm, o que corresponde a uma distância mínima de trabalho de 30 cm para o equacionamento aplicado (FLIP-CHIP-OPTO, 2016a). Nesse contexto, as curvas da Figura 16 mostram a variação de YPF exigido para o sistema de acordo com a equação (3.6), com variação da distância entre 0,3 – 1 m, YPFD requerido ($561\ \mu\text{mol}/\text{m}^2$) e o diâmetro de dossel entre 0,2 – 1 m (área de $0,031 - 0,5\ \text{m}^2$).

A maioria dos LEDs comerciais, quando não aplicados especificamente para horticultura, não apresentam valores em grandezas quânticas. Portanto, se faz necessária a conversão de seu fluxo radiante para fluxo YPF pela equação (2.5). O YPF calculado para o COB APOLLO 600 é de $426,1\ \mu\text{mol}/\text{s}$ e encontra-se indicado na Figura 16. Assim, para YPFD médio máximo ($561\ \mu\text{mol}/\text{m}^2$) com dossel de lúpulo de $0,126\ \text{m}^2$, a distância calculada deve ser de aproximadamente 46,7 cm do dossel ao COB, lembrando que o mesmo pode ser posicionado mais perto do dossel de forma a incrementar o YPFD incidido até um valor limitante abaixo do qual a temperatura da luminária não prejudique o tecido foliar da copa e a radiação não cause fotoinibição (TAIZ et al., 2014).

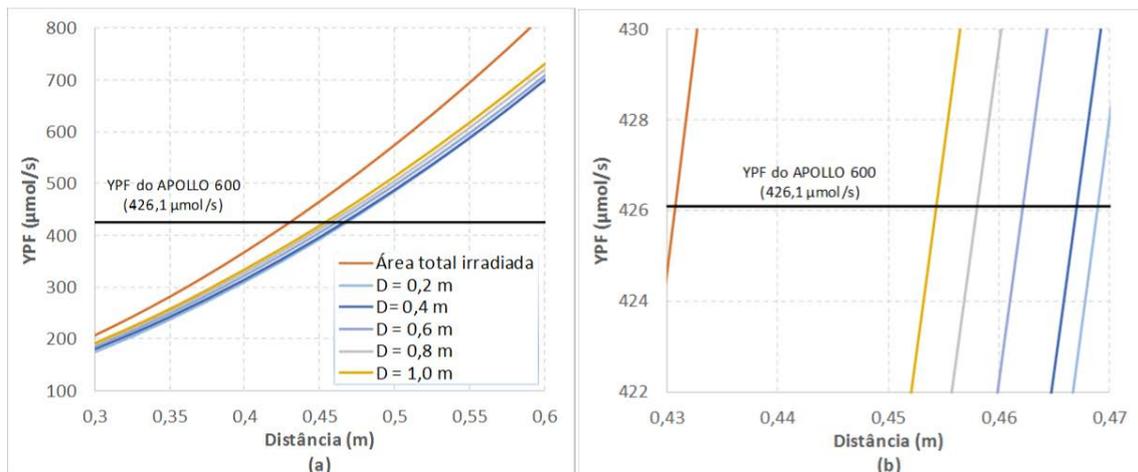


Figura 16. Curvas de YPF estimado do APOLLO 600 para YPFD constante de $561\ \mu\text{mol}/\text{m}^2$, dossel entre 0,2 a 1 metro e distância variando de (a) 0,3 a 0,6 e (b) Figura ampliada para região de interesse.

Uma luminária com disposição convencional para LEDs discretos apresenta dimensões que geralmente superam a consideração para fonte radiante pontual. Sendo assim, a mesma deve ser interpretada como fonte linear, plana ou matricial, composta por fontes radiantes pontuais. Para horticultura, como há a combinação de diferentes tipos de LEDs, a luminária geralmente é melhor representada por um modelo matricial de arranjo. Calcula-se, então, a intensidade radiante dos tipos de LEDs encontrados na luminária e se relativiza sua posição no plano, fazendo uma sobreposição de intensidades no plano radiado. Esse método é apresentado em Tavares et al. (2018b) como uma alternativa mais complexa na resolução do problema por depender de artifício de software para cálculo de YPFD incidente no dossel.

3.2.2 Arranjo dos LEDs e estrutura da luminária

Como a região do vermelho é a mais efetiva na produção fotossintética, a luminária deve apresentar uma maior concentração de radiação nessa região do que na região do azul. Essa proporção não é bem definida na literatura, tendo proporções diversas a partir de combinações entre vermelho distante, vermelho, laranja, azul e branco em diferentes proporções (VAYOLA, 2018) (FLIP-CHIP-OPTO, 2016b) (HARUN, et al., 2015) (RUNKLE & HEINS, 2001). Alguns trabalhos abordam um intervalo entre 10 a 30% como proporção de azul dependentemente da espécie tratada, com maior eficiência de produção e sem comprometimento fisiológico da planta (YORIO, et al., 2001) (NHUT, et al., 2000) (NHUT, et al., 2003) (MASSA, et al., 2008). Para o presente trabalho, atentando para a manipulação de espectro em função do estímulo ao crescimento vegetal e floração do lúpulo (CRAIN, 2011), optou-se por estabelecer uma relação de fluxo fitométrico (YPF) de aproximadamente 4:1 de LEDs vermelho para azul (80% em vermelho e 20% em azul), seguindo a bibliografia (MASSA, et al., 2008).

A luminária desenvolvida constituiu-se de dois canais independentes e conectados ao mesmo dissipador. Cada canal foi separado por cor (modelo) de LED, já que os LEDs azuis têm características eletrotérmicas distintas dos LEDs vermelhos. O canal “1” é o canal “R” (*Red*), e é composto de vinte LEDs vermelhos, “*Hyper red*”, remessa 4T2U (660nm, 480 mW, 2,46 $\mu\text{mol/s}$ @ 350 mA) (OSRAM Opto Semiconductors, 2016b). O canal “2” é o canal azul ou “B” (*Blue*), e é composto por oito LEDs azuis, “*Deep blue*”, remessa UOVJ-W4 e (451 nm, 635 mW, 1,76 $\mu\text{mol/s}$ @ 350 mA) (OSRAM Opto

Semiconductors, 2016a). A Tabela 4 lista os resultados por folha de dados, encontrados por meio da conversão para YPF pelo desenvolvimento análogo à equação (2.5) de densidade de fluxo YPFD.

Cada canal tem seu arranjo de LEDs conectados em série, o que garante o sistema operar em correntes mais baixas, uniformidade de corrente e, conseqüentemente, uniformidade de fluxo e desempenho térmico em cada unidade (ALMEIDA, et al., 2011). Além disso, trabalhar com canais separados permite flexibilidade de proporção espectral entre vermelho e azul, fator importante para a condução de experimentos com plantas, já que as mesmas possuem perfil espectral adequado diferenciado para distintos estágios de desenvolvimento (RUNKLE & HEINS, 2001).

Tabela 4. Valores de potência e de fluxo por modelo unitário e canal de LEDs.

Modelo de LED	Corrente (mA)	Por Unidade			Arranjo (20 R e 8 B)		
		P _e	Φ _{rad}	YPF	P _e (W)	Φ _{rad} (W)	YPF (μmol/s)
Vermelho	350	0,72	0,425	2,18	14,4	9,6	49,19
	1000	2,5	1,267	6,49	50	25,34	129,8
Azul	350	0,991	0,69	1,91	7,93	5,08	14,06
	1000	3,125	1,448	4,01	25	11,58	32,08
Total	350		-		22,33	14,68	63,25
	1000		-		75	36,92	161,9

O *layuot* da placa de iluminação objetivou um projeto térmico efetivo de dissipação e uniformidade de fluxo e de espectro eletromagnético. Para anexação dos LEDs ao dissipador, se utilizou uma placa intermediária de “Metal Core”, cuja função é o aumento da dissipação térmica do sistema em detrimento de uma menor resistência térmica de interfaceamento quando comparada às placas de fenolite (JUNTUNEN, et al., 2012). Por fim, se utilizou um dissipador haletado retangular, condizente com o exigido para o projeto térmico da luminária detalhado posteriormente, na sessão 3.2.3.2.

A placa foi feita com otimização da extensão livre para ilhas de cobre formando um primeiro estágio de dissipação de calor dos LEDs. Os LEDs foram posicionados a uma distância máxima de 2 cm entre si atentando para o critério de uniformidade de fluxo apontado por Dias (2012) para arranjos retangulares. Em adição, os LEDs vermelhos foram posicionados na periferia da placa, onde há maior dissipação, e os LEDs azuis foram posicionados ao centro. Esse arranjo foi priorizado devido ao conjunto de LEDs do canal R (vermelho) apresentar em potência dissipada em forma de calor superior ao

dobro da potência dissipada para o canal B (azul). Além disso, esse arranjo concilia o roteamento das trilhas, otimizando suas distâncias e o espaçamento entre LEDs. Por fim, foi utilizado um processo de máscara, utilizando tinta fotossensível com ilhas de cobre exposto para contatos térmicos e elétricos dos LEDs e contato térmico para anexação de sensor de medição da temperatura da placa (T_C). O processo de máscara provê maior isolamento e, portanto, necessidade de menor distância entre trilhas no layout final. A Figura 17 mostra o projeto da luminária (porte do dissipador, layout e disposição da placa).

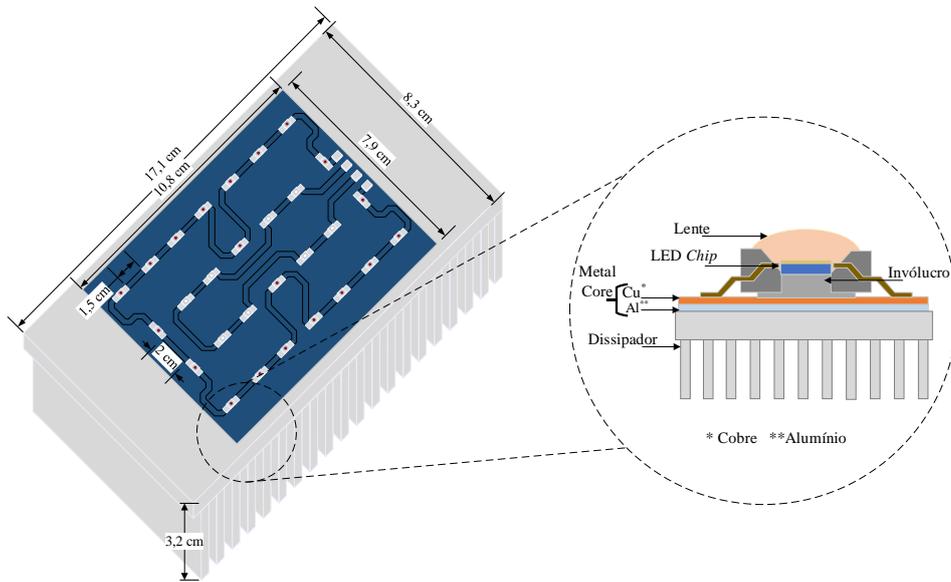


Figura 17. Protótipo da luminária e layout de arranjo dos canais R e B em placa.

3.2.3 Modelagem PET

As características radiométricas de emissão e distribuição espectral das cargas LED dependem, mutuamente, de seu aspecto elétrico (tensão, corrente e potência dissipada) e térmico (dissipação térmica da temperatura de junção, do *case* e atmosférica). A modelagem PET, ou modelagem foto-eletro-térmica (*photo-electro-thermal*), considera a correlação entre esses três fatores para determinar a caracterização física e dinâmica do perfil da carga LED e, conseqüentemente, definir sua região de operação e controlabilidade (HUI, 2017). A Figura 18 mostra as interações entre esses três fatores com representação positiva, para aspectos que aumentam um determinado parâmetro e negativas, para aspectos que reduzem determinado parâmetro. Por exemplo, o aumento da corrente direta no LED causa um aumento de fluxo e de potência dissipada.

Consequentemente, se há maior produção de calor, a temperatura do sistema eleva, degradando o fluxo e diminuindo também a tensão direta (ALMEIDA, et al., 2015).

A modelagem PET pode ser feita por análise estática e dinâmica. A análise estática trabalha na região de regime estacionário para estimar valores de fluxo e temperatura de junção uma vez que o regime térmico é atingido (HUI & QIN, 2009) (BENDER, et al., 2013a). Já a análise dinâmica, proposta em trabalhos mais recentes, compreende as perturbações de corrente em torno de determinado ponto de trabalho decorrentes de *drivers* conectados à rede elétrica. Esse aspecto diferencial se mostra influente na expressão do fluxo, da eficiência radiométrica e da geração de cintilação luminosa (BENDER, et al., 2013b) (ALMEIDA, et al., 2015).

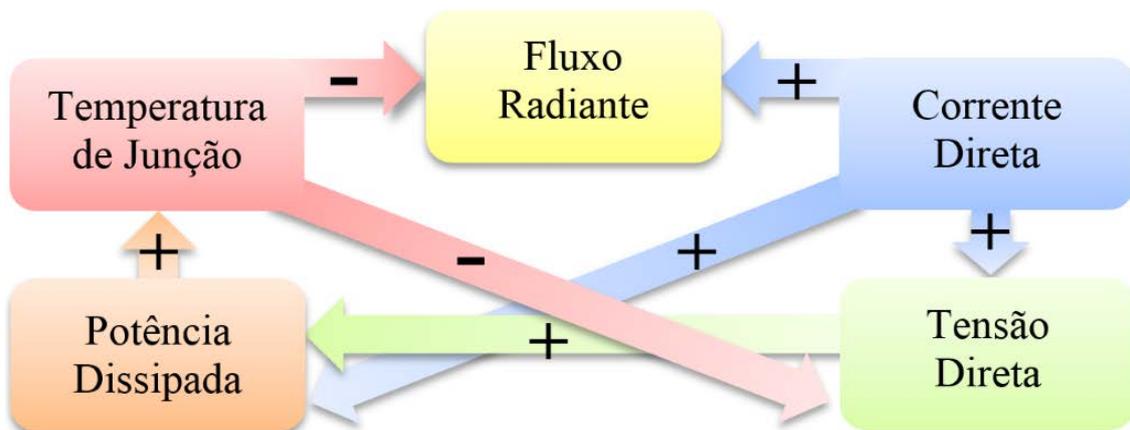


Figura 18. Interações entre grandezas e térmica, elétricas e radiométricas em um sistema de iluminação a LED. Figura adaptada (BENDER, 2012).

É importante atentar que a análise PET está associada a um modelo voltado a sensibilidade visual humana, determinando o comportamento fotométrico do LED. Portanto, para o trabalho com plantas, é mais adequado adotar um modelo genérico e análogo de modelagem pelo perfil radiométrico ou quântico da luminária, tendo sua representação em RET (*radio-electro-thermal*) ou YET (*yield-electro-thermal*), respectivamente. Os desenvolvimentos teórico e experimental para validação de modelagem de carga LED foram feitos em base RET, ou seja, com dados de fluxo radiante no sistema radiométrico. Para efeito quantitativo de YPF, os valores encontrados podem ser convertidos de acordo com a curva de distribuição espectral do LED ou SPD (*spectral power distribution*), $P(\lambda)$, como apontado na sessão 2.2.2 pela equação (2.5) (COSTA & CUELLO, 2013).

Esta sessão contempla a modelagem RET estática da luminária prototipada almejando sua controlabilidade por parte do equacionamento matemático para estimativa

indireta do fluxo radiante de ambos os canais, sem aferição da temperatura do sistema. Além disso, o circuito térmico possibilita o projeto de um dissipador com resistência térmica adequada para o protótipo. Para tais fins, será detalhado o modelo linear aproximado do comportamento elétrico do LED, o modelo térmico equivalente da luminária junto ao dissipador utilizado e o desenvolvimento analítico para a validação da modelagem RET aplicada.

3.2.3.1 Modelo Elétrico

O LED possui mesmo perfil de curva elétrica (tensão por corrente) dos demais tipos de diodo semicondutores de junção P-N. Sua representação pode ser feita por meio de uma curva Schottky modificada com a inserção de uma resistência parasita série (R_S) como mostrado na equação (3.7) (SCHUBERT, 2003) (ALMEIDA, et al., 2011):

$$V_{LED}(I_{LED}) = \frac{n_i k T_j}{q_e} \ln \frac{I_{LED}}{I_S} + R_S I_{LED} \quad (3.7)$$

, em que n_i é o fator de idealidade, k é a constante de Boltzmann ($1,381 \times 10^{-23}$ J/K) e q_e é a carga elementar do elétron ($1,602 \times 10^{-19}$ C). No entanto, para efeito de simplificação da modelagem RET, o LED pode ser representando por uma curva linear por partes de elementos linearizados e idealizados (ALMEIDA, et al., 2011). Sua representação conceitual é composta de um diodo direcional de corrente, uma fonte de tensão reversa ao sentido da corrente, representado sua tensão de limiar V_t , e uma resistência interna série do LED r_d , cujo valor determina a inclinação da curva linear aproximada do comportamento elétrico do LED em condução direta. A Figura 19 apresenta os componentes elétricos que compõem o modelo linear equivalente aproximado do LED com sua expressão matemática evidenciada pela equação (3.8):

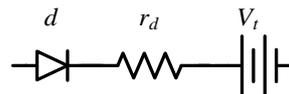


Figura 19. Modelo elétrico linear equivalente aproximado de diodos emissores de luz.

$$V_{LED}(I_{LED}) = r_d I_{LED} + V_t \quad (3.8)$$

3.2.3.2 Modelo térmico do arranjo e dimensionamento do dissipador

O modelo eletrotérmico de dissipação é composto pelo conjunto das unidades geradoras de calor (LEDs) e pelos componentes de dissipação (placa de cobre e dissipador). Q_{thx} é expresso na equação (3.9) e representa a quantidade de potência dissipada pelo LED “x” (vermelho ou azul). O efeito de dissipação é inversamente proporcional à resistência térmica do sistema. Essa resistência é composta por um arranjo em série de equivalência circuital, como mostrado na Figura 21, e inclui uma resistência térmica de junção ($R_{th_{jc}}$), que varia linearmente com a temperatura e com o modelo do LED, uma resistência térmica de interfaceamento ($R_{th_{in}}$) e uma resistência térmica do dissipador ($R_{th_{hs}}$) (TAO, et al., 2010). O valor da resistência térmica de interfaceamento geralmente está bem aquém da ordem de grandeza dos demais valores do sistema, podendo ser desprezado para efeito de simplificação (ALMEIDA, 2014). Sendo assim, a temperatura de *case* pode ser considerada igual à temperatura do dissipador pelo circuito equivalente da Figura 20.

$$Q_{th_x} = k_{hx} V_x I_x \quad (3.9)$$

,sendo que k_{hx} é o coeficiente que indica a porção de energia elétrica do modelo de LED “x” que é convertida em energia térmica.

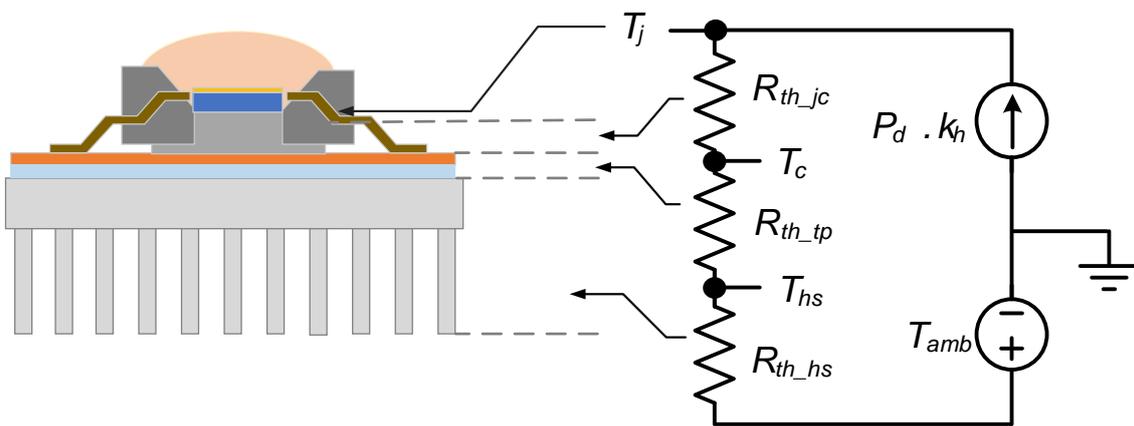


Figura 20. Sistema térmico em equivalência do circuito de um LED associado a uma placa metal core e dissipador.

Cada LED é representado por um ramo no circuito formado por sua respectiva fonte de corrente Q_{thx} e pela resistência térmica de junção. A associação discreta de LEDs acomodados a um mesmo dissipador com dois canais é equivalente a um grupo de ramos N e M , paralelos entre si e conectados em série com o dissipador $R_{th_{hs}}$. O grupo N está

associado ao número de ramos de LEDs do canal vermelho, enquanto que o ramo M está associado ao número de LEDs do canal azul. Os valores da temperatura são dados por valores equivalentes de tensão elétrica, sendo a temperatura ambiente (T_{amb}) representada por uma fonte de tensão e a temperatura de junção T_j representada pelo nó acima da fonte de dissipação de calor de cada canal. A Figura 21 mostra o circuito equivalente eletrotérmico da luminária prototipada.

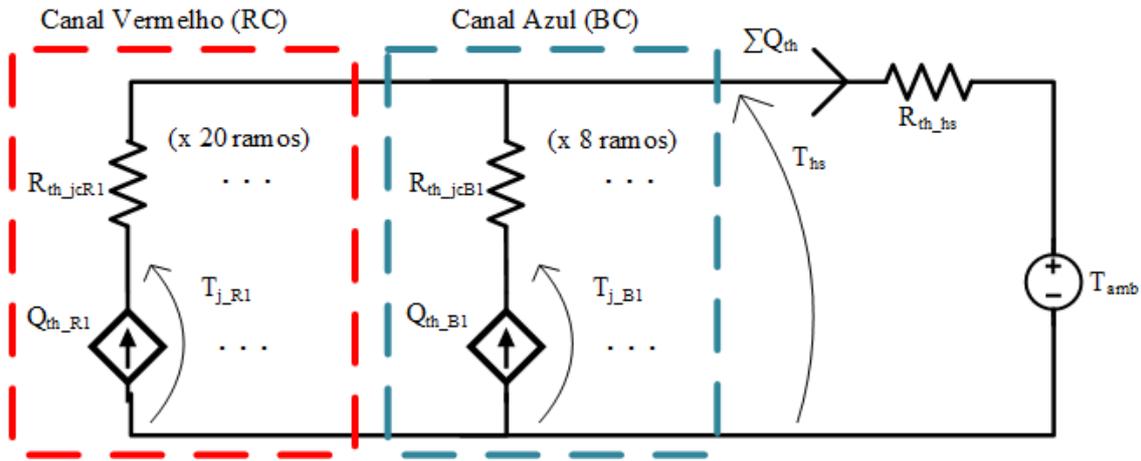


Figura 21. Circuito equivalente térmico da luminária prototipada incluindo os canais R e B.

As equações (3.10) e (3.11) são provenientes de uma análise por Kirchoff do circuito apresentado na Figura 21 e determinam a resistência de dissipação necessária para operação adequada do sistema em níveis da temperatura que não comprometem a integridade física dos LEDs. Substituindo a equação (3.11) em (3.10), tem-se a respectiva resistência térmica de projeto para o canal “x”:

$$T_{hs} - T_a = (Q_{thR} + Q_{thB})R_{th_{hs}} \quad (3.10)$$

$$T_{hs} = T_{jx} - Q_{th_x} \frac{R_{th_{jcx}}}{n_x} \quad (3.11)$$

$$R_{th_{hsx}} = \frac{T_{jx} - T_a - \frac{Q_{th_x} R_{th_{jcx}}}{n_x}}{(Q_{th_R} + Q_{th_B})} \quad (3.12)$$

Pela folha de dados de ambos os modelos de LEDs analisados, a temperatura de junção máxima tolerada é de 135 °C. Além disso, como já mencionado anteriormente, temperaturas mais elevadas de trabalho degradam o fluxo significativamente. Dessa forma, os cálculos do projeto do dissipador foram feitos com estipulação da temperatura

de junção máxima admissível de 70 °C, para ambos os modelos R e B, atentando para uma degradação de fluxo inferior a 5% da nominal, conforme mostrado nos gráficos da Figura 22.

A resolução da equação (3.12) foi feita considerando a potência térmica máxima de dissipação linear de cada canal, sem efeitos de diminuição da tensão de limiar do LED e um coeficiente térmico constante.

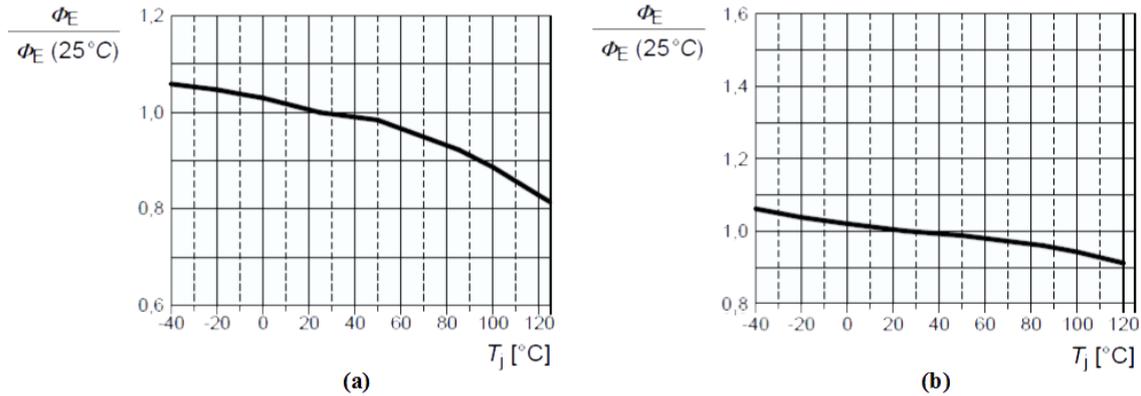


Figura 22. Degradação de fluxo radiante por temperatura de junção do LED: (a) Vermelho e (b) Azul. Figura adaptada (OSRAM Opto Semiconductors, 2016a) (OSRAM Opto Semiconductors, 2016b).

A resistência térmica do dissipador calculada em relação ao canal R ($T_{jR} = 70$ °C, $k_{hR} = 0,44$ @ $V_R = 55,5$ V e $I_R = 1$ A) foi de 1,438 °C/W, enquanto que em relação ao canal B ($T_{jB} = 70$ °C, $k_{hB} = 0,31$ @ $V_B = 25,84$ V e $I_B = 1$ A) foi de 1,445 °C/W. O resultado próximo de projeto para os dois canais é devido a ambos partilharem do mesmo dissipador. Dessa forma, foi escolhido um dissipador retangular haletado com resistência térmica de 1,25 °C/W e de dimensões já apresentadas pela Figura 17.

3.2.3.3 Princípio de estimação da temperatura e fluxo radiante

A estimação do fluxo radiante do sistema é feita para cada canal, separadamente, considerando o comportamento elétrico, térmico e radiométrico e suas correlações, como já apresentado anteriormente. Para este trabalho a análise estática (sob regime térmico estacionário e corrente constante) foi considerada suficiente para as devidas aplicações de controlabilidade da luminária.

Pela teoria da modelagem PET, a temperatura influi nos parâmetros elétricos do modelo elétrico do LED da seguinte maneira:

- Tensão de limiar decresce com aumento da temperatura devido à mudança na energia da banda proibida e, conseqüentemente, redução da diferença de potencial necessária na junção p-n para gerar um fluxo de elétrons (SCHUBERT, 2003) (JUNIOR, 2010);
- Variação de resistência dinâmica (r_d) em função da temperatura (GACIO, et al., 2012).

No entanto, a variação da resistência dinâmica é pouco expressiva em relação às variações de tensão de limiar mediante mudança da temperatura do sistema e, portanto, pode ser desconsiderada para o devido equacionamento matemático do modelo. Assim, a equação (3.13) é uma adaptação do modelo linear elétrico do LED, representada pela equação (3.8), que considera as alterações na tensão limiar em função da diferença entre a temperatura de junção e a temperatura de referência pela folha de dados (T_0), através do coeficiente de variação da tensão, k_v (BENDER, et al., 2013a).

$$V_{LED}(I_{LED}, T_j) = r_d I_{LED} + [V_0 + k_v(T_j - T_0)] \quad (3.13)$$

Pela análise eletrotérmica do sistema é possível propor uma representação do circuito equivalente modificada para o modelo RET. A Figura 23 mostra esse modelo detalhando o arranjo para o canal vermelho e com encapsulamento do canal azul, já que este apresenta modelo análogo de elementos.

O circuito da Figura 23 pode ser separado em dois domínios: elétrico, formado pelo modelo linear do LED, e o térmico, formado pelo arranjo térmico da resistência equivalente do arranjo dos LEDs, resistência térmica do dissipador e fonte de tensão referente a temperatura ambiente. No domínio elétrico, a fonte de tensão controlada reproduz o comportamento da variação da tensão de limiar por temperatura de junção do LED. A fonte de corrente representa a geração de calor quantificada por k_h e proveniente da não idealidade de conversão da energia elétrica em fótica do LED. Pelo equacionamento do circuito da Figura 23, pode-se chegar a seguinte expressão da temperatura de junção.

$$T_{jx}(T_c, V_x, I_x) = Q_{th_x} R_{th_jcx} + T_c \quad (3.14)$$

Nesse caso, a temperatura de junção passa a depender da potência dissipada, da resistência térmica equivalente de junção do canal e da temperatura de *case* (aproximada

pela temperatura do dissipador). Isso pode gerar dificuldades de implementação prática devido aos seguintes motivos:

- Maior suscetibilidade a erros de medição devido a não uniformidade da temperatura na placa;
- Maior complexidade de sensoriamento devido à inserção de periférico de medição da temperatura;
- Aumento de custo no *driver* final proposto por parte da complexidade do sistema de medição;

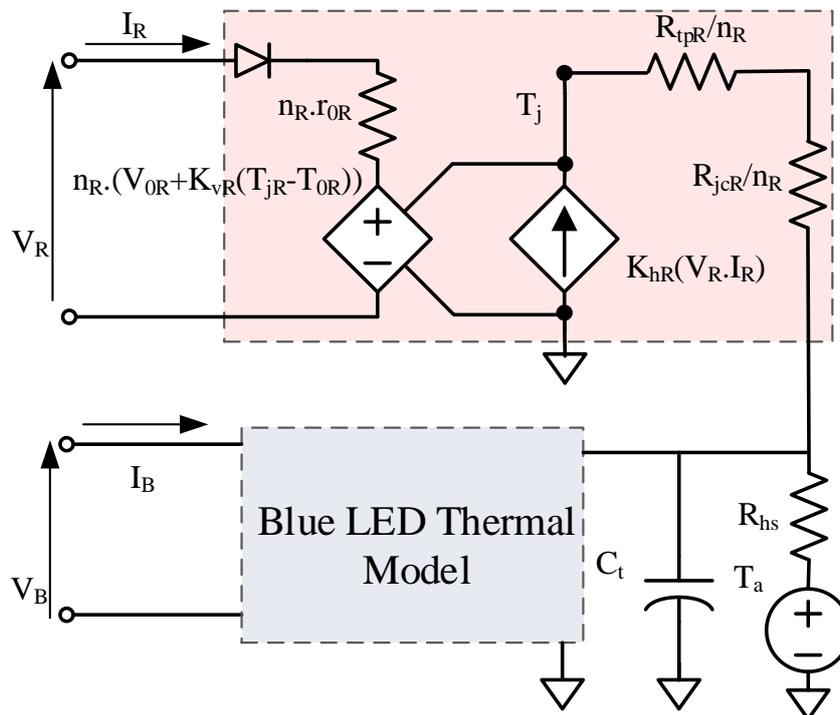


Figura 23. Circuito equivalente térmico da luminária prototipada (TAVARES, et al., 2017).

- Insuficiência de informações quanto ao coeficiente angular térmico de variação da resistência de junção por temperatura, o que acarreta em erros de dedução da temperatura de junção devido a considerações errôneas de resistência de junção invariável do respectivo canal analisado.

Assim, o trabalho propõe a modelagem para estimação de fluxo com aquisição da temperatura indiretamente, sem a utilização de sensores térmicos, por meio da utilização de parâmetros de projeto e medições elétricas de tensão e corrente já aquisitadas para controlabilidade do circuito de acionamento da luminária.

A aquisição da temperatura de junção pode ser feita pela equação (3.15) ou (3.16). O primeiro método para aquisição da temperatura de junção provém da manipulação da

equação (3.12), que se tem a temperatura de junção do canal de LEDs a partir dos parâmetros elétricos medidos e do conhecimento da resistência térmica de junção equivalente por canal (fornecido pela folha de dados em modelo caixa branca) e resistência térmica do dissipador projetado. Já a equação (3.16) provém da manipulação da equação (3.13) e se diferencia da equação anterior por depender restritamente dos parâmetros elétricos, coeficiente de variação de tensão (fornecida pela folha de dados) e temperatura padrão de testes (T_0):

$$T_{jx}(V_x, I_x, R_{th_jcx}) = \frac{Q_{th_R} + Q_{th_B}}{R_{th_hs}} + \frac{Q_{th_x} R_{th_jcx}}{n_x} + T_a \quad (3.15)$$

$$T_{jx}(V_x, I_x) = \frac{\frac{V_x}{n_x} - r_{0x} I_x - V_{0x}}{k_{vx}} + T_{0x} \quad (3.16)$$

, em que T_a é a temperatura ambiente, T_{0x} é a temperatura padrão utilizada na folha de dados para testes, r_{0x} é a resistência dinâmica do LED para temperatura padrão e n_x é o número de LEDs conectados em série.

Tendo a interação eletrotérmica modelada, se faz necessário a correlação com o fator radiométrico para a conclusão do modelo RET. Para isso, utilizam-se as curvas de fluxo radiante por corrente e fluxo radiante por temperatura de junção fornecidas pelo fabricante para definir o comportamento eletrradiométrico e termoradiométrico, respectivamente. Quando não há fornecimento das duas curvas, as mesmas podem ser extraídas de duas rotinas experimentais distintas; variando a corrente com temperatura constante e variando a temperatura com corrente constante para medição do fluxo radiométrico. Mais detalhes dessas rotinas experimentais são mostrados pelos trabalhos de HUI (2017) e ALMEIDA (2014). A Figura 24 reúne as quatro curvas utilizadas para a caracterização RET dos modelos de LED utilizados para a luminária. Essas foram construídas por meio da digitalização das curvas por folha de dados e extrapolação linear das regiões de operação dos LEDs. As curvas linearizadas estão em preto, enquanto que as reais curvas retiradas da folha de dados encontram-se nas respectivas cores de modelo de LED.

Sob temperatura de junção constante, o comportamento de fluxo radiante do LED cresce linearmente com o incremento da corrente (Figura 24(c)), desprezando o efeito de *efficiency drop* (KIM, et al., 2007). Em um segundo caso, para corrente no LED

constante, o fluxo decresce com o aumento da temperatura de junção (Figura 24(d)). Porém, para essa relação, o decremento de fluxo não é plenamente linear. A região em intervalos abaixo de 20 graus possui perfil de curva distinto da região entre 20-120 °C para os modelos de LEDs tratados (OSRAM Opto Semiconductors, 2016a) (OSRAM Opto Semiconductors, 2016b). Portanto, a linearização da curva foi feita desconsiderando regiões abaixo de 20 °C, pressupondo que a temperatura de junção do LED não atinja valores inferiores a 20 °C por observação empírica. A Tabela 5 lista e indexa os coeficientes angulares (c_{1x} e d_{1x}) e lineares (c_{0x} e d_{0x}) encontrados pela extrapolação linear das quatro curvas da Figura 24 para os dois modelos de LEDs utilizados. Na próxima sessão, esses parâmetros serão aplicados à equação (3.17) de estimação de fluxo proposta por BENDER, et al., (2013a) e ALMEIDA et al., (2015) pelos métodos de dedução da temperatura de junção apresentados anteriormente neste trabalho e comparados com os valores de fluxo radiante encontrados com os resultados empíricos do protótipo de luminária para validação de seu modelo RET.

Tabela 5. Parâmetros encontrados pela extrapolação das curvas da Figura 24.

Curva Proveniente	Parametro	Red LED	Blue LED
Corrente x Tensão	V_{0x}	1.8 V	2.75 V
	r_{0x}	0.855 Ω	0.352 Ω
Fluxo x Corrente	d_{0x}	0.062	0.249
	d_{1x}	2.623 A^{-1}	2.072 A^{-1}
Fluxo x Temperatura	c_{0x}	1.068	1.03
	c_{1x}	$-1.834 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ C^{-1}$	$-0.899 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ C^{-1}$

$$\Phi_x(I_x, T_{jx}) = n_x \Phi_{0x} (d_{0x} + d_{1x} I_x) (c_{0x} + c_{1x} T_{jx}) \quad (3.17)$$

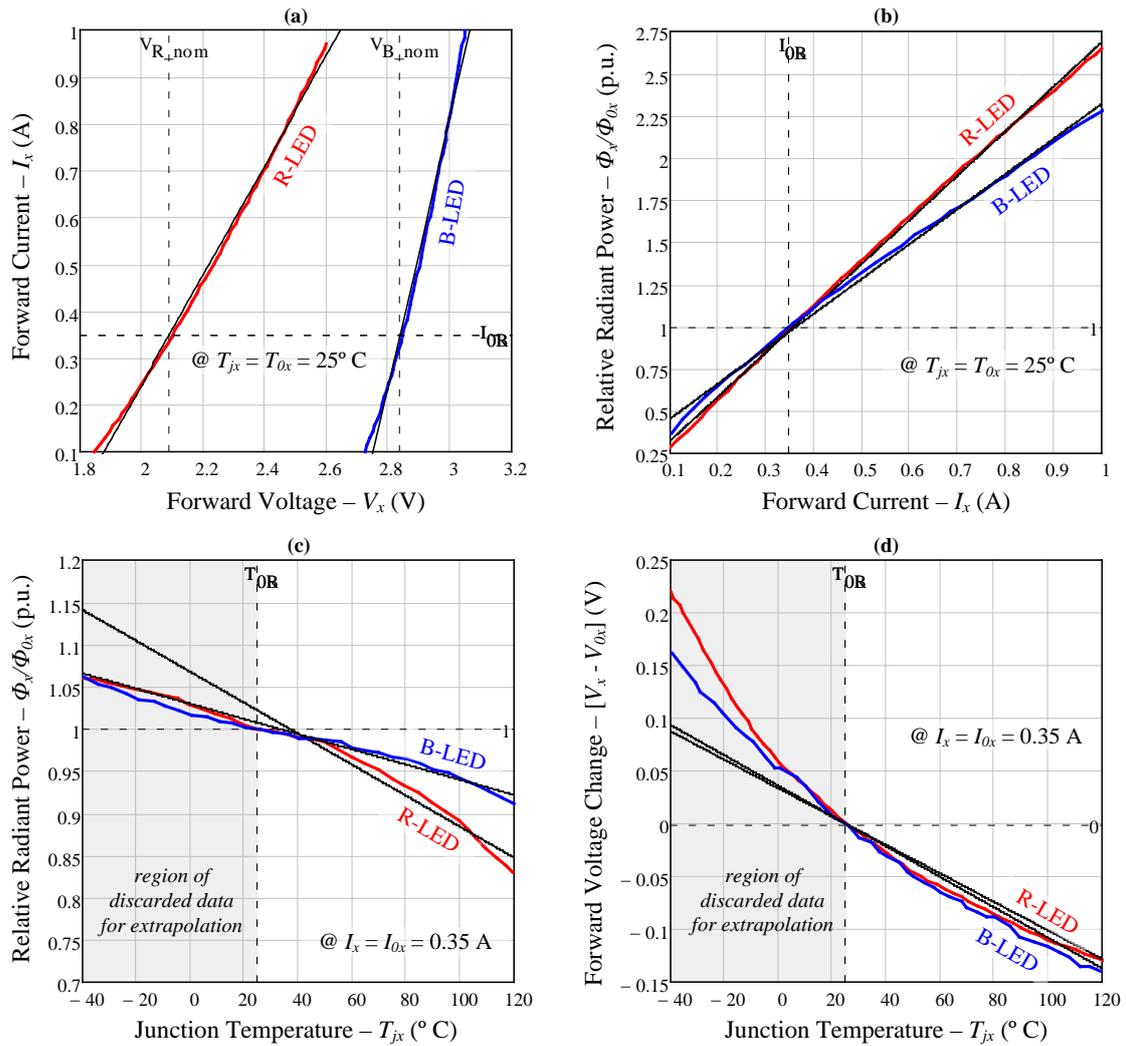


Figura 24. Curvas características dos modelos de LED azul e vermelho de OSRAM (2016^a) e OSRAM (2016b) e extrapolação linear. (a) corrente por tensão, (b) fluxo radiante normalizado por corrente, (c) fluxo radiante normalizado por temperatura de junção e (d) variação de tensão terminal por temperatura de junção (TAVARES, et al., 2017).

3.2.4 Resultados de caracterização e validação da luminária

O processo de validação de caracterização de estimação do comportamento RET da luminária pode ser dividido em quatro etapas. A primeira trata da validação do projeto do dissipador mediante à temperatura de junção estipulada para trabalho e a comparação da aquisição com um Termovisor. A segunda refere-se à validação teórica por simulação do circuito equivalente térmico da Figura 23 e da modelagem RET em software PSIM para analisar a dinâmica correlacionada dos três fatores (radiométrico, elétrico e térmico) resumida nas curvas da Figura 24. A terceira etapa trata da validação da estimativa de fluxo pela modelagem RET por meio da comparação de resultados empíricos extraídos

da medição com uma esfera integradora. A quarta e última validação refere-se aos cálculos para estimar a densidade de fluxo incidente no dossel com dados de fluxo pela folha de dados sob temperatura padrão de medição. Os dados calculados são comparados com os medidos por um difusor cossenoidal e o arranjo experimental considerando a altura e a área de medição reguláveis para simulação do posicionamento e do tamanho do dossel em relação à luminária.

3.2.4.1 Validação experimental do projeto do dissipador

A Figura 25 é a concatenação de fotografias obtidas com o uso do Termovisor Fluke TI125 (FLUKE CO., 2012) do protótipo de luminária desenvolvido para mostrar o desempenho térmico do layout sem e com ventilação forçada (dois ventiladores com velocidade de vento de 3,6 m/s @ 1,2 W), operando a 350 e 1000 mA de corrente em ambos os canais.

As Figuras 25 (a) e (b) apresentam apenas o dissipador projetado de 1,25 °C como elemento de dissipação principal. Pode-se observar que a temperatura média da placa de iluminação, onde os LEDs estão depositados, é de 54,5 °C e 86,2 °C para as correntes de operação de 0,35 A e 1 A, respectivamente. Porém, as temperaturas mais elevadas são localizadas na região de junção do LED, com temperatura máxima registrada de 94,2 °C, bem superior ao estimado de 70 °C com emprego do dissipador projetado. Isso ocorre devido ao projeto do dissipador ter considerado a potência de dissipação do LED linear em função do aumento da corrente, o que de fato não ocorre devido à degradação térmica e, portanto, o aumento da parcela dissipada de potência dos canais. O mais adequado seria considerar o modelo RET de forma a estimar a potência dissipada para cada canal na temperatura máxima de junção estipulada de projeto (70 °C). Nesse contexto, se torna atrativo a inserção de ventiladores com a finalidade de aumentar o efeito de dissipação e trabalhar com temperaturas mais baixas no sistema potencializando, consequentemente, o desempenho de fluxo radiado pela luminária. Portanto, foram adicionados à luminária ventiladores de 1,2 W e velocidade de vento de 3,6 m/s (medida com anemômetro adjacente à saída de ar do dispositivo) para o processo de ventilação forçada, aumentando a capacidade de dissipação do sistema. Nas Figuras 25 (c) e (d) se observa um decremento substancial nas temperaturas do plano de luz com a utilização de dois ventiladores anexados ao dissipador. Na Figura 26 é mostrada a diferença do desempenho fótico por

meio de medição do fluxo radiante da luminária prototipada sob diferentes níveis de degradação por temperatura, consequentes de diferentes cenários de ventilação forçada e operacionalização dos canais.

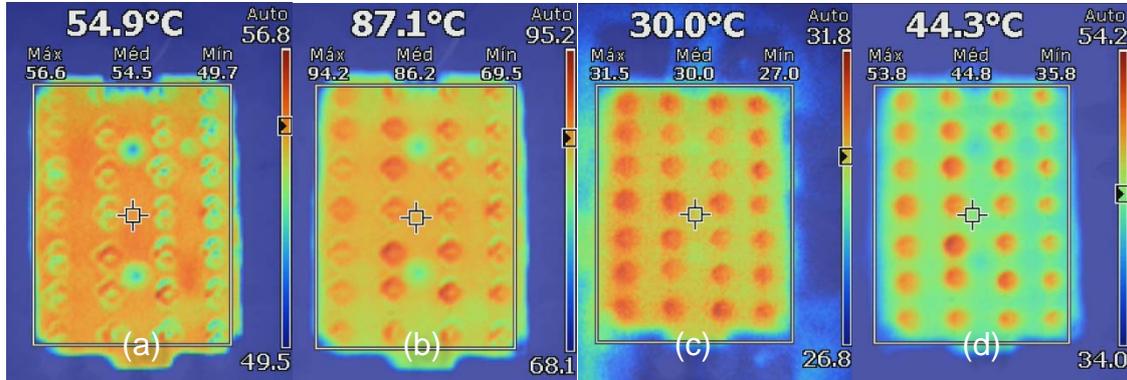


Figura 25. Análise de luminária 2 pelo termovisor. a) e b) estão sem ventilação forçada e operando em 0,35 A e 1 A, respectivamente. c) e d) estão sob ventilação forçada e mesma corrente.

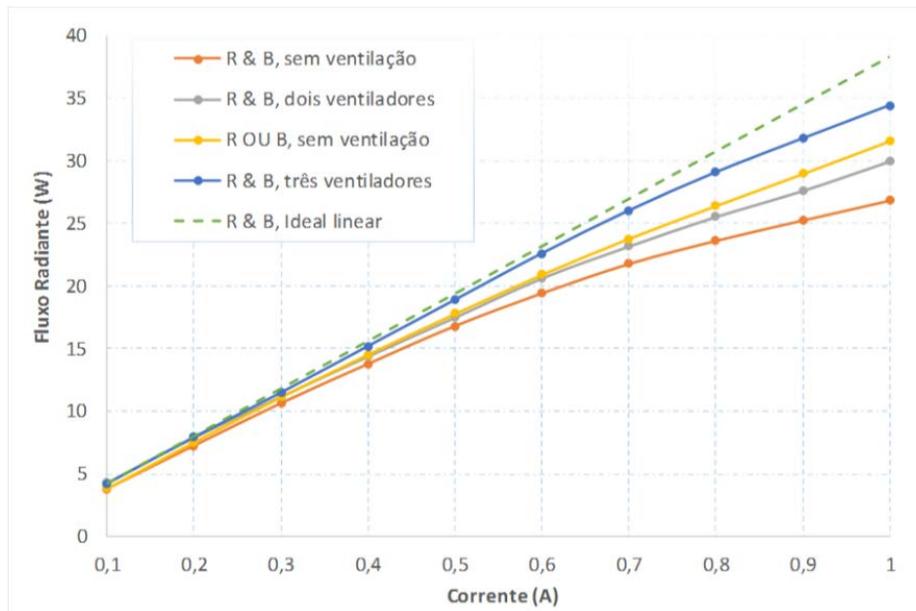


Figura 26. Comparação do desempenho radiométrico entre luminárias prototipadas, com e sem ventilação forçada e ideal linear.

A curva em laranja, na parte inferior, descreve o desempenho fótico da luminária operando com os dois canais em simultâneo e sem ventilação forçada. Pode-se observar que a mesma tem resultados muito inferiores ao premeditado de uma característica ideal linear entre fluxo e corrente (curva tracejada em verde). Isso se deve a elevada temperatura de junção dos LEDs para esse sistema e uma decorrente de degradação expressiva do fluxo (HUI & QIN, 2009) (ALMEIDA, et al., 2015). A segunda curva, em cinza, é referente à operação da luminária com dois ventiladores, apresentando um

aumento considerável de fluxo de acordo com a diminuição de resistência térmica equivalente do dissipador. A curva em amarelo corresponde a uma condição que não possui ventilação forçada, porém, opera com os dois canais alternadamente, de maneira a gerar menos calor para ser dissipado no sistema. Por fim, a curva em azul apresenta um comportamento aproximadamente linear ideal entre 0,1 a 0,6 A devido à utilização de três ventiladores no protótipo. Essa configuração foi eleita para utilização em experimentos de maneira a atingir maiores valores de YPFD e maior flexibilização do projeto quanto à altura entre a luminária e a planta, não relevando incremento de consumo de energia ou preço do sistema por adição dos ventiladores.

3.2.4.2 Validação teórica de modelo RET por *software*

Esta etapa tem como objetivo certificar-se da análise do circuito (mostrado em 3.2.3.3) para o comportamento fótico, com observação da interação térmica entre os canais vermelho e azul para o regime permanente. Para isso, o circuito da Figura 23 foi reproduzido em PSIM para os canais vermelho e azul com a inserção de uma fonte de corrente como entrada para o fornecimento de potência. Essa fonte de corrente substitui um conversor CA-CC com finalidade de simplificar e agilizar a rotina de simulação, já que o tempo de integração do conversor é expressivamente menor que o tempo de integração da dinâmica térmica entre os dois canais, dissipador e respectivas respostas de fluxo.

Os resultados de simulação foram registrados na Figura 27, que mostra os comportamentos térmico, elétrico e radiométrico (normalizado) pela monitorização da temperatura de junção, corrente e fluxo radiante estimado e medido por cada canal, respectivamente.

A simulação compreende um tempo total de 300 s. Uma capacitância térmica de 10 J/K foi adicionada ao dissipador de resistência térmica 1,25 °C/W (mesma resistência do dissipador aplicado no protótipo) para acelerar o comportamento térmico em simulação. A simulação executada segue a seguinte rotina estabelecida:

- Em 100 s, o fluxo de referência do Canal Azul (B) é incrementado, em degrau, de 80% para 100%;

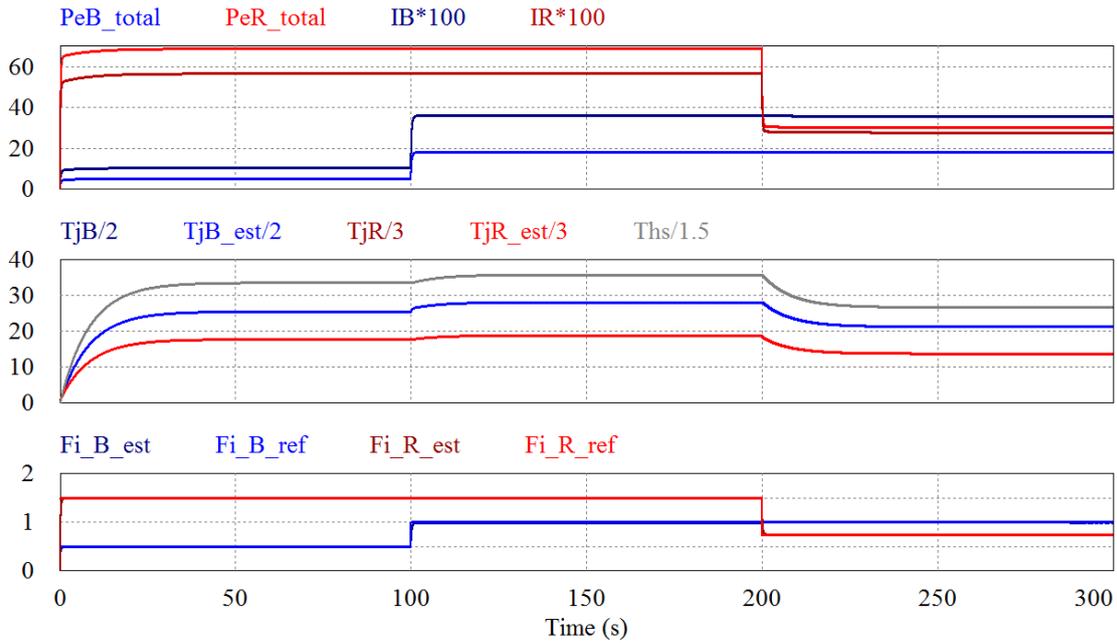


Figura 27. Resultados de simulação do circuito equivalente térmico da luminária projetada para cada canal mostrados separadamente. A primeira tela mostra a potência elétrica e corrente total. A segunda tela mostra as temperaturas de junção e do dissipador. A terceira tela apresenta a resposta de fluxo normalizado com valor de base da folha de dados.

- Em 200 s, o fluxo de referência do Canal Vermelho (R) é decrementado, em degrau, de 100% para 40%.

Pelo fato de se tratar de uma simulação em *software*, o fluxo de referência e o fluxo estimado são encontrados pela mesma equação e, portanto, apresentam o mesmo perfil de curva ao longo do tempo, para ambos os canais. O processo ocorre analogamente com a temperatura de junção estimada e medida. Pelos *grids* 1 e 2 da simulação pode-se observar uma variação direta entre a potência injetada e a elevação da temperatura do sistema e, mais significativamente, da temperatura de junção do canal em questão.

A Figura 28 focaliza nas regiões de 100 s e 200 s de simulação, onde ocorrem as mudanças em degrau de referência de fluxo para o canal azul e vermelho, respectivamente. Dessa forma, outro comportamento térmico de menor escala ao relatado pode ser observado entre as temperaturas de junção. Aumentando a potência de injeção no canal azul (B) a temperatura de junção do canal vermelho (R) sofre um pequeno incremento devido a um aumento da temperatura total do sistema, já que ambos os canais estão conectados ao mesmo dissipador. O processo inverso ocorre com a temperatura de junção em B, que decresce quando a potência dissipada por R diminui. Essa segunda mudança tem maior escala que o processo de aumento da temperatura de junção em R,

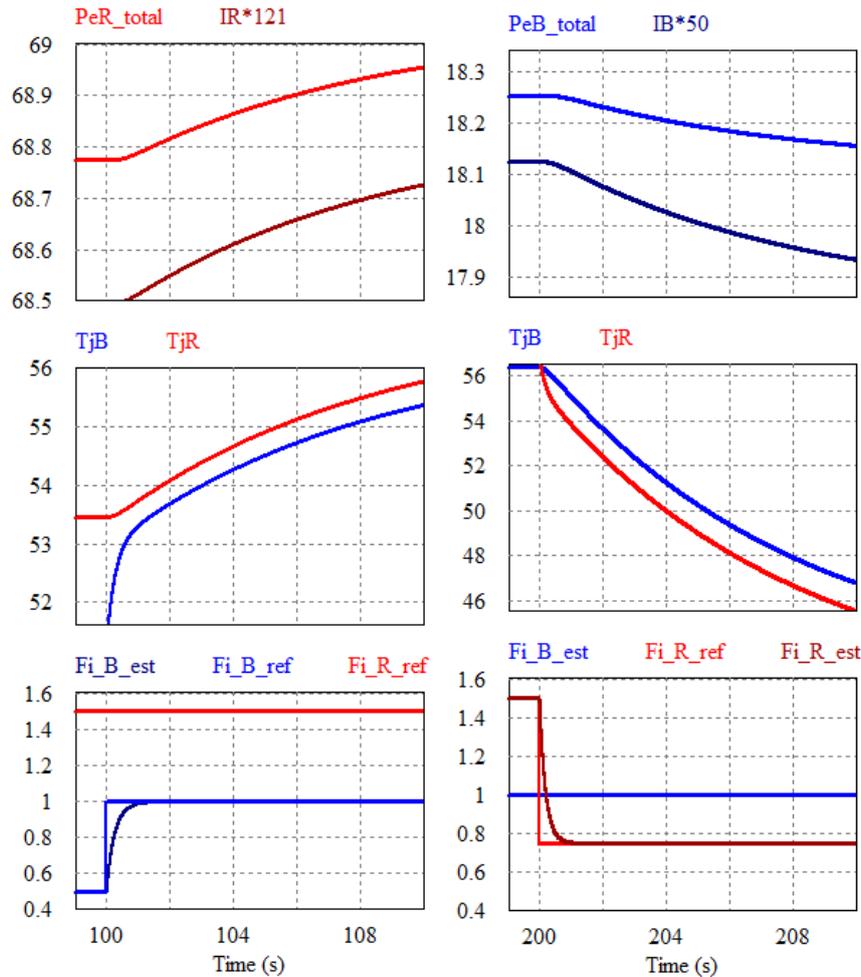


Figura 28. Região ampliada na dinâmica de eventos térmicos proveniente de alteração de fluxo dos canais azul e vermelho nos eventos de mudança de referência de fluxo (100 s para canal azul e 200 s para canal vermelho).

anteriormente descrito, devido ao maior número de LEDs vermelhos no sistema e, conseqüentemente, a uma maior parcela de potência dissipada no mesmo.

Outro fator de interação RET entre canais pode ser observado pelo comportamento de fluxo radiante. Além de cada fluxo responder em concordância com a corrente injetada no canal, o mesmo varia inversamente com a temperatura de junção do respectivo canal, evidenciando a dinâmica RET de degradação de fluxo por elevação da temperatura. Neste contexto, a injeção de corrente em um dos canais influencia o fluxo no outro canal em menor expressividade pelo fato de estarem integrados ao mesmo dissipador. Em outras palavras, quando se diminui o fluxo do canal R em 200 s, ocorre um decréscimo gradativo da temperatura do dissipador, o que influi em um pequeno incremento de fluxo radiante no canal B. Este fenômeno é mais perceptível em B pois, novamente, as alterações nos parâmetros de R influem mais no sistema, decorrente do mesmo possuir a maioria dos LEDs na luminária.

3.2.4.3 Validação empírica de estimador de fluxo pela modelagem RET

A validação da modelagem RET é feita comparando o fluxo encontrado no processo analítico descrito em 3.2.3.3 com os valores de fluxo medidos na esfera integradora. O arranjo experimental realizado para as medições radiométricas, elétricas e térmicas é ilustrado na Figura 29.

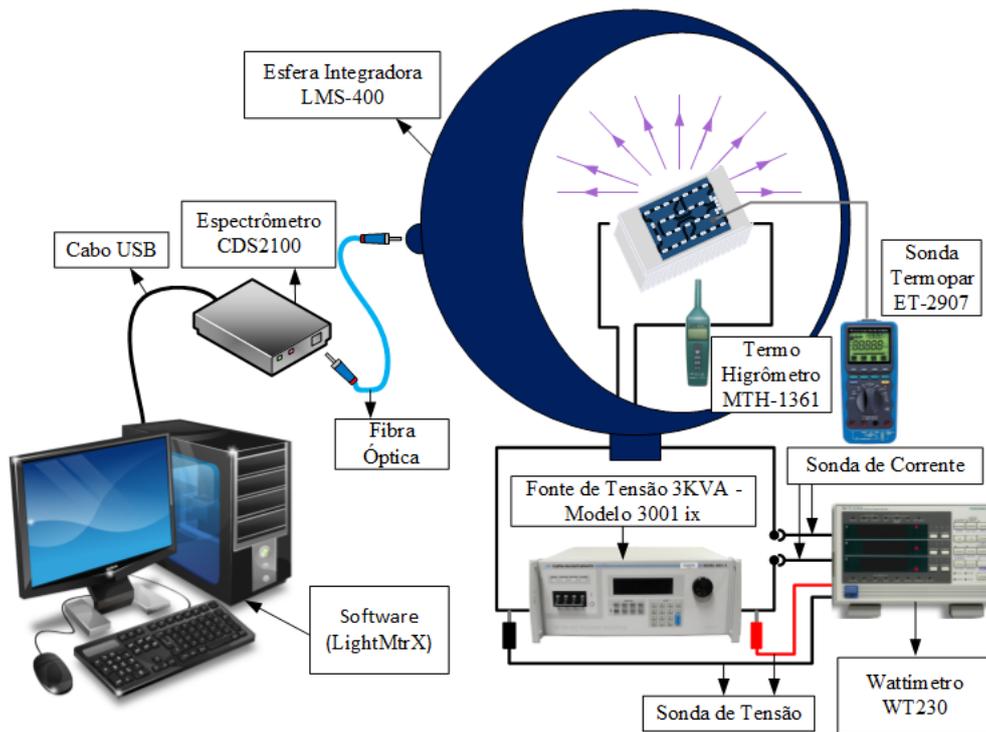


Figura 29. Arranjo experimental de medição radio-eleto-térmicas para validação da modelagem RET.

Os equipamentos utilizados para medição podem ser subdivididos de acordo com cada esfera da modelagem RET. As pontes de tensão e de corrente (Yokogawa WT230) são usadas para medir, respectivamente, a tensão e a corrente média de cada canal da luminária, fornecendo também a potência total de cada canal. O termo higrômetro (Minipa MTH-1361) instalado próximo às haletas do dissipador faz a medição da temperatura ambiente, enquanto que o termopar (Minipa ET-2907), instalado na superfície do *metalcore* (placa de iluminação), mede a temperatura do *case*. Por fim, a esfera integradora (LMS400) desempenha a função de isolar a luminária do meio externo e fazer a aquisição da radiação da mesma para ser quantificada em fluxo radiante e processado seu espectro eletromagnético pelo espectrômetro (CDS2100) e pelo software dedicado (LightMtrix).

Foram determinados dez pontos de operação, variando a corrente igualmente em ambos os canais com passo de 0,1 A, excursionando entre 0,1 a 1 A (corrente máxima por folha de dados). A rotina de medição foi iniciada em corrente máxima do sistema (ambos os canais em 1 A), com uma espera próxima de 30 minutos antes da aquisição da primeira medida de fluxo por motivos de estabilização térmica. Os tempos de espera entre as demais medidas foram entre seis e dez minutos, quando a corrente nos canais se estabilizava. Sete parâmetros foram medidos para cada ponto de operação arbitrado: corrente e tensão de ambos os canais, temperatura ambiente e da placa, e fluxo radiométrico emitido por nanômetro de comprimento de onda. A Figura 30 mostra uma fotografia do arranjo experimental em análise.



Figura 30. Detalhes do experimento de validação RET em andamento.

O experimento foi realizado no mesmo dia, para as rotinas de luminária operando com e sem ventilação forçada. A ventilação forçada foi inserida após observar uma substancial degradação de fluxo a partir de uma corrente de 0,5 A, como citado anteriormente. A mesma foi inserida como rotina experimental com dois ventiladores, no intuito de testar a validação RET proposta para o âmbito mais abrangente de dissipação com e sem ventilação. Além disso, foram realizados dois ensaios com abordagens diferentes para a validação RET:

- Ensaio 1: Os dois canais operaram em simultâneo e se utilizou apenas os parâmetros da folha de dados para dedução de fluxo (modelo caixa

branca). Nesse experimento foram incluídos os resultados de validação com e sem ventilação forçada;

- Ensaio 2: Realizado com cada canal separadamente (ora o canal vermelho e ora o canal azul funcionando). Utilizou-se também o modelo “caixa branca” e apenas o cenário sem ventilação forçada, já que pela alternância de canais em funcionamento, trabalhou-se com uma potência dissipada substancialmente inferior ao Ensaio 1.

As Figuras 31(a) e 31(b) são resultados da comparação para o primeiro cenário de teste do Ensaio 1, com os canais operando em simultâneo e sem ventilação forçada. As figuras incluem os resultados experimentais de medição de fluxo, estimativa RET por medição da temperatura de *case* e por cálculo da temperatura de junção utilizando a equação (3.15) e (3.16).

Os resultados são mostrados na totalidade de fluxo emitido pela luminária e para cada canal (R e B), já que pelo *software* utilizado é possível discretizar o SPD para extração de proporção de fluxo total emanado de cada canal, em cada ponto de operação.

As Figuras 32(a) e 32(b) explicitam os resultados de comparação para o Ensaio 1 (canais operando em simultâneo) e cenário 2 (com ventilação forçada).

Analisando primeiramente as diferenças de resultados entre as Figuras 31 e 32, pode-se confirmar novamente as melhoras no desempenho de fluxo da luminária sob ventilação forçada. As diferenças observadas na comparação das duas figuras também evidenciaram que a validação RET não têm grandes diferenças de erros para cenário com e sem ventilação forçada, apresentando maiores erros para a técnica de medição da temperatura de *case*, principalmente para correntes mais elevadas.

As Figuras 33(a) e 33(b) apresentam os resultados do Ensaio 2, com canais operando separadamente e com o cenário sem ventilação forçada.

Pode-se observar de um modo geral, que as estimativas de ambos os canais, separada e integradamente (total), apresentam resultados satisfatórios, conforme mostrados nas Figuras 31, 32 e 33, com um maior erro para o canal azul. Porém esse erro é pouco expressivo no resultado final da estimação do fluxo radiante total da luminária, devido à potência do canal azul ser bem inferior e de haver uma compensação de erros na soma de fluxo dos canais (erro negativo para o canal vermelho e positivo para o azul). Além disso, o método de estimativa indireta (com temperatura de junção calculada)

apresenta melhores resultados de estimação que a estimativa com medição da temperatura.

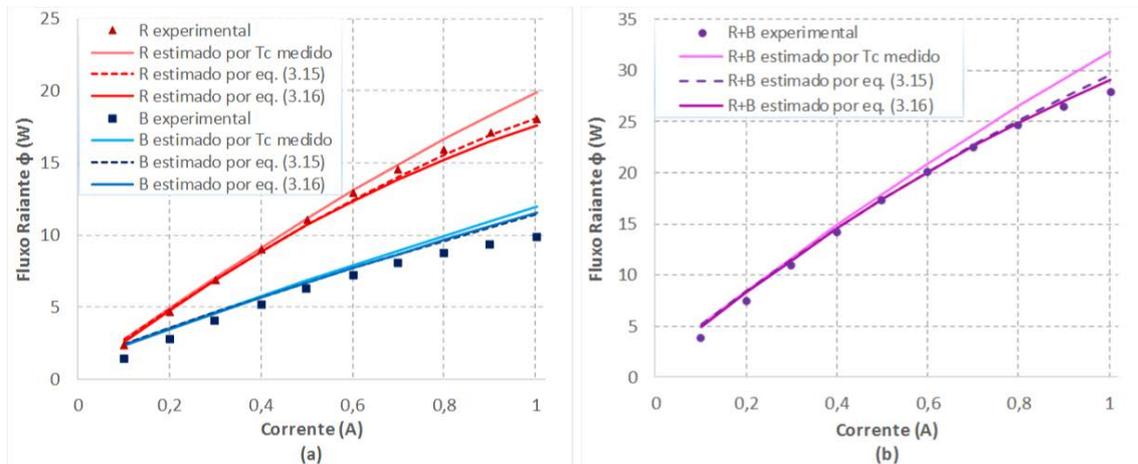


Figura 31. Comparação de resultados de fluxo radiante por canal e total, encontrados para operação de dois canais em simultâneo e sem ventilação forçada.

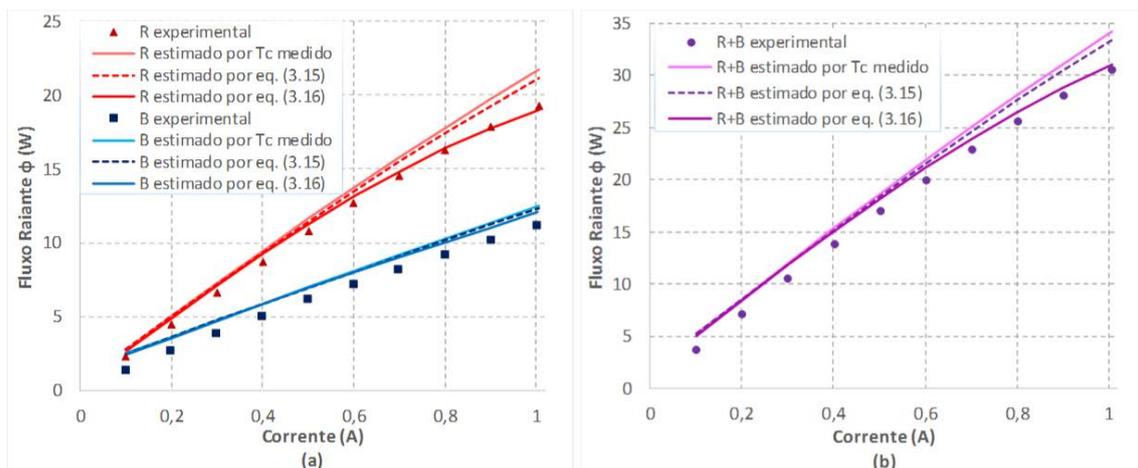


Figura 32. Comparação de resultados de fluxo radiante por canal e total, encontrados para operação de dois canais em simultâneo e com ventilação forçada.

Isso se deve à complexidade de aquisição da temperatura na placa, pois foi realizada apenas uma medição em um ponto específico enquanto que a temperatura apresenta diferenças na extensão do plano. A exatidão da temperatura no local medido também fica comprometida, já que a inserção do termopar depende de uma delicada anexação de contato e os *gaps* de ar ou impurezas podem causar erros de medição. Por fim, pode-se ressaltar pela Figura 32, em particular, que a modelagem pela equação (3.16) apresenta resultados mais aproximados com o experimental do que pela equação (3.15). Isso se deve ao primeiro depender apenas de parâmetros bem definidos por medição elétrica ou pela folha de dados, enquanto que, o segundo, referente à equação (3.15),

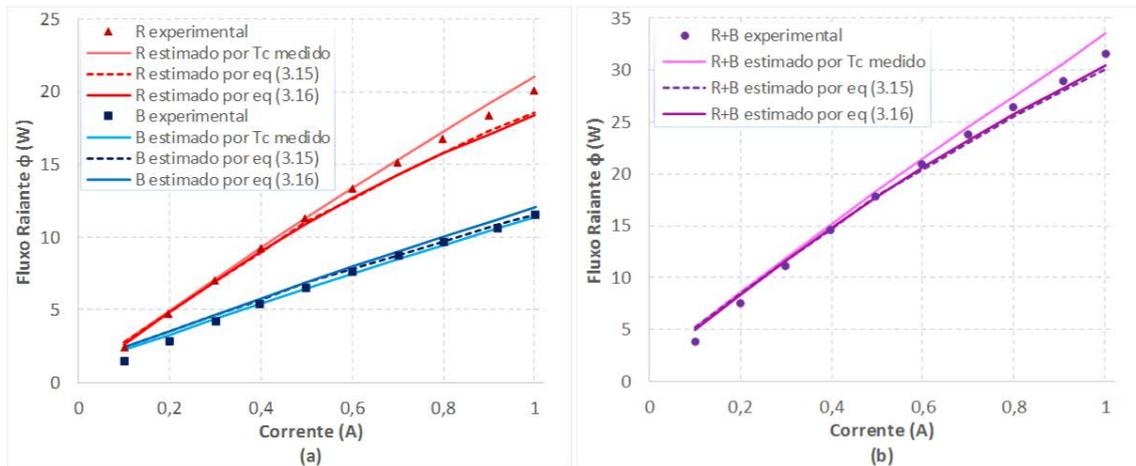


Figura 33. Comparação de resultados de fluxo radiante por canal e total, encontrados para operação de dois canais em simultâneo e sem ventilação forçada.

apresenta susceptibilidade de erro maior devido a estimativa da resistência térmica do dissipador sob ventilação forçada e da errônea consideração da resistência térmica de junção invariante com temperatura.

A Tabela 6 é um resumo dos experimentos conduzidos e da quantificação dos erros, por canal e por intervalo de dimerização, encontrados pelas três técnicas apresentadas de aquisição empregadas e do cálculo da temperatura.

A lista de erros da Tabela 6 ilustra a observação de tendências entre os ensaios realizados:

- Para todos os ensaios e métodos os erros do canal azul foram superiores aos do canal vermelho e do total de fluxo. Isso pode estar associado aos desvios nos valores dos parâmetros utilizados de acordo com a folha de dados do LED azul para fluxo nominal e de tensão terminal, conforme observado para condução de método em caixa cinza não explicitado neste trabalho;
- Para todos os ensaios feitos o erro encontrado para a modelagem considerando a aquisição da temperatura de *case* foi significativamente superior ao erro encontrado para a modelagem calculando indiretamente a temperatura de junção por parâmetros elétricos. Isso corrobora não apenas com a validação do método RET proposto como mostra melhores resultados para sistemas em caixa branca;

- O erro para ensaios com ventilação forçada supera em aproximadamente 5% os erros sem ventilação, podendo explicitar a validação da modelagem RET para ambos os cenários abordados;
- O método da equação (3.15) apresenta resultados muito semelhantes dos resultados pelo método da equação (3.16), com exceção do cenário em ventilação forçada. Isso comprova que o método de cálculo da temperatura de junção restritamente pelos parâmetros elétricos e de k_v pela equação (3.16) apresenta melhores resultados de modelagem para aplicação em cenários diferenciados de dissipação, i.e., recurso de refrigeração dinâmica e estática;
- Os erros para região mais restrita de dimerização, entre 0,3 A e 1 A, apresentam valores expressivamente menores que a excursão total de operação da luminária, entre 0,1 A e 1 A. Isso se deve à modelagem RET apresentar maior reprodutibilidade das curvas de variações elétricas e térmicas na região medial de operação de corrente;
- Os erros de estimativa discreta, por canal, são superiores ao erro de fluxo total pelo erro do vermelho compensar o do azul. Porém, o erro médio por canal é de 4,76% para o canal vermelho e 13,7% para o canal azul, com erros máximos de 10,96% para o canal vermelho e 22,08% para o canal azul. Assim, o conjunto de erros se julga suficiente para validar a modelagem RET por canal e consequente manipulação espectral do sistema com razoável exatidão.

3.2.4.4 Validação empírica da estimação da densidade de fluxo

A validação da estimação da densidade de fluxo se subdivide em duas rotinas: validação por fonte pontual para COB LED e por consideração da fonte pontual da luminária RB. O arranjo experimental envolvido para ambas pode ser observado na Figura 34.

Os equipamentos utilizados para a medição de YPFD compartilham do mesmo arranjo elétrico de acionamento e de medição do experimento com a Esfera Integradora para validação RET. Tem-se a fonte de tensão Califórnia 3001 ix para acionar o COB LED ou luminária RB, enquanto que o wattímetro é utilizado para configurar a operação

Tabela 6. Resumo de erro dos ensaios realizados em relação aos valores empíricos obtidos na Esfera Integradora.

Experimento		Ensaio 1a	Ensaio 1b	Ensaio 2	
Operação da luminária		R + B	R + B	R OU B	
Ventilação forçada		Sem	Com	Sem	
Erro por dimerização total (0,1 a 1 A) (%)	Método por medição de T_c	Canal R	4,41	10,96	3,79
		Canal B	20,05	22,08	15,94
		Total	10,17	15,13	8,36
	Método por eq. (3.15)	Canal R	3,5	9,1	5,29
		Canal B	17,53	21,08	12,06
		Total	6,31	13,59	6,85
	Método por eq. (3.16)	Canal R	3,59	5,12	4,8
		Canal B	16,79	19,49	13,44
		Total	5,09	10,21	5,76
Erro por dimerização total (0,3 a 0,8 A) (%)	Método por medição de T_c	Canal R	1,45	8,44	1,35
		Canal B	11,38	14,32	8,17
		Total	5,04	10,59	3,86
	Método por eq. (3.15)	Canal R	2,89	6,62	3,53
		Canal B	9,01	13,34	4,51
		Total	1,44	9,08	2,44
	Método por eq. (3.16)	Canal R	3,47	3,83	3,63
		Canal B	8,87	12,5	6,17
		Total	1,16	6,99	1,95

do LED em condições mais próximas possíveis da nominal para o COB (T_j de 25 °C @ 6 A) e nominal e máxima potência para o RB (T_j de 25 °C @ 0,35 A e 1 A). A estrutura para medições radiométricas diferenciam os dois experimentos realizados, de validação RET e da densidade de fluxo. Enquanto que a esfera apresenta sua própria estrutura de confinamento para medição, é necessário criar uma estrutura com o mesmo princípio para a medição concisa da densidade de fluxo com o difusor. Para isso, foi criada uma estrutura dedicada ao experimento com plano perfurado e ajuste de altura. Assim, as aquisições com o difusor são feitas de maneira a criar um plano virtual de medição para cada altura de experimento, determinando o YPPFD médio para determinada área do dossel e distância da luminária. A lente do difusor utilizada foi a CC-3-UV-S, que faz a aquisição da radiação direta incidida no plano que é processada pelo espectrômetro CDS 610, sendo a informação tratada nos *softwares* utilizados (*Spectra Suite* e *Ocean Optics*). Dos *softwares* se extraiu a densidade de fluxo radiante e de produção (YPPFD) para, por fim,

serem utilizados na média de YPFD do plano. Esse dado é o resultado final do experimento que foi comparado com o resultado da estimativa calculado.

A Figura 35a mostra os resultados do experimento realizado com a luminária Apollo para três diferentes áreas de dossel (diâmetros D iguais a 0,4, 0,6 e 0,8) e variação de altura entre 0,2 a 1 metro com passo de 0,1 m por plano de medição. Os resultados experimentais foram plotados juntos com os resultados obtidos pelo modelo de estimativa pontual de radiação direta para os mesmos cenários de dossel e alturas estipulados. A Figura 35b focaliza a região das curvas próxima ao valor almejado de $561 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ para melhor observação da diferença entre a curva estimada e a gerada por aproximação polinomial dos pontos extraídos experimentalmente.

Os experimentos com a luminária Apollo apresentaram erro médio de distância de 5,2% para diâmetro de dossel de 0,4 m, 4,7% para diâmetro de 0,6 m e 6,5% para 0,8 m. Para YPFD de $561 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, o erro para cada dossel foi de 4,7%, 3,1% e 0,2%, respectivamente. A Figura 36 apresenta o resultado da distribuição da densidade de fluxo calculada e medida sobre o plano de diâmetro de 0,8 metros e na distância de 0,5 metros entre a luminária e o dossel. A Figura 36a apresenta a distribuição de YPFD tridimensional, enquanto que a Figura 36b apresenta a mesma distribuição em corte transversal, em função do distanciamento do eixo central de referência do plano irradiado.

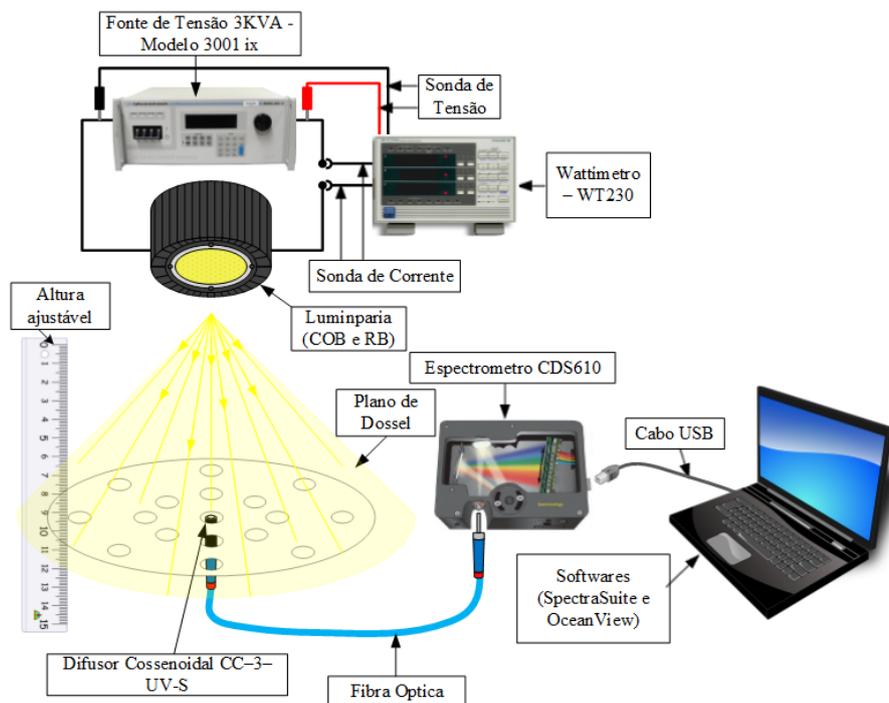


Figura 34. Arranjo experimental com difusor cossenoidal para aquisição de YPFD em plano virtual (dossel) com altura ajustável.

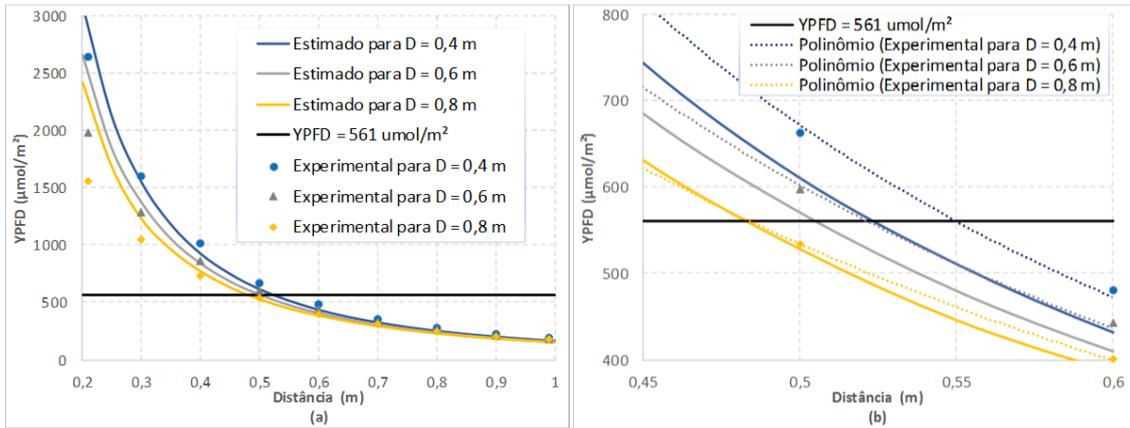


Figura 35. A) Comparação de resultados da luminária Apollo por estimação e por experimento de densidade de fluxo YFPD em função de distância para três diâmetros de dossel diferentes. B) Resultados ampliados na região do YFPD desejado (561 μmol/m²).

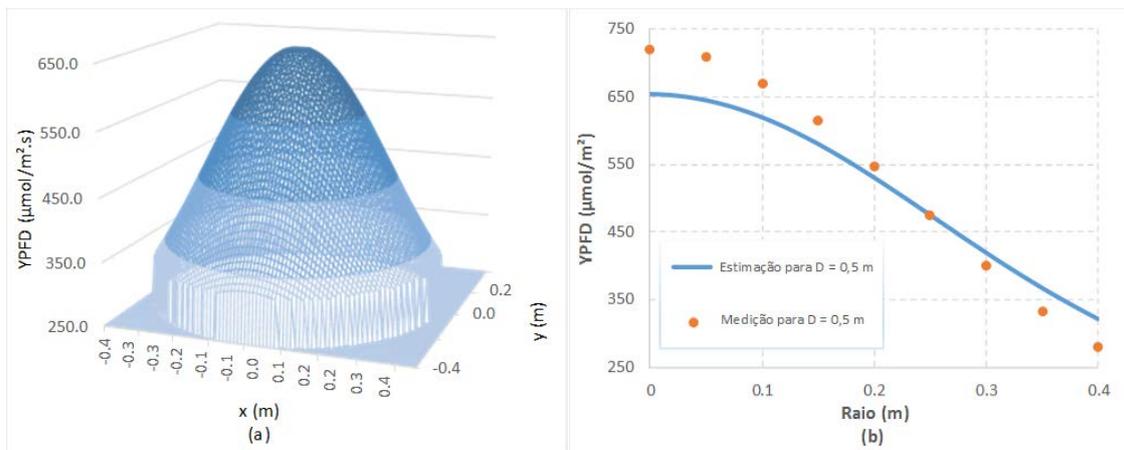


Figura 36. (a) Distribuição da densidade de fluxo calculado em disposição tridimensional e (b) corte transversal de densidade de fluxo calculado em comparação com o medido em função do raio. Plano de 0,8 m de diâmetro e altura de 50 cm para luminária Apollo.

A Figura 37 mostra os resultados de comparação da Luminária RB analogamente aos cálculos feitos com o Apollo por estimação de incidência direta e considerando a fonte pontual, apesar das dimensões da luminária RB a caracterizarem como um arranjo matricial de fonte radiante, como citado na sessão 3.2.1.2. Dessa forma, pode-se ponderar o erro que a modelagem pontual proposta neste trabalho apresenta para a estimação de YFPD em aplicações com fontes não pontuais.

Os experimentos com a luminária RB apresentaram erro médio de distância de 2,1% para diâmetro de dossel de 0,4 m, 2,8% para diâmetro de 0,6 m e 4,2% para 0,8 m. Para YFPD de 561 μmol/m² o erro para cada dossel foi de 1,7%, 8,0% e 22,8%, respectivamente. A comparação entre as distâncias estimadas e as distâncias medidas apresentaram melhores resultados do que o Apollo, com exceção em 561 μmol/m² que apresentaram resultados bem superiores aos demais. Dessa forma, pode-se inferir que o

modelo de estimação aplicado também pode ser utilizado para luminárias matriciais com dimensões reduzidas, no caso específico da luminária RB, 7,2 cm de largura por 10,1 cm de comprimento. A Figura 38 apresenta o resultado da distribuição de densidade de fluxo calculado e medido sobre o plano de diâmetro de 0,8 metros e distância de 0,5 metros entre a luminária RB e o dossel. Pode-se adiantar que a mesma apresentou erros mais perceptíveis de distribuição da densidade de fluxo nas regiões de centro e bordas, cujos valores medidos foram inferiores aos calculados. Esses erros podem estar atrelados à degradação de fluxo por rápida elevação da temperatura do módulo, já que o procedimento de aquisição da densidade de fluxo não é feito de forma instantânea e a luminária opera em sua condição de corrente máxima tolerada (1 A por canal).

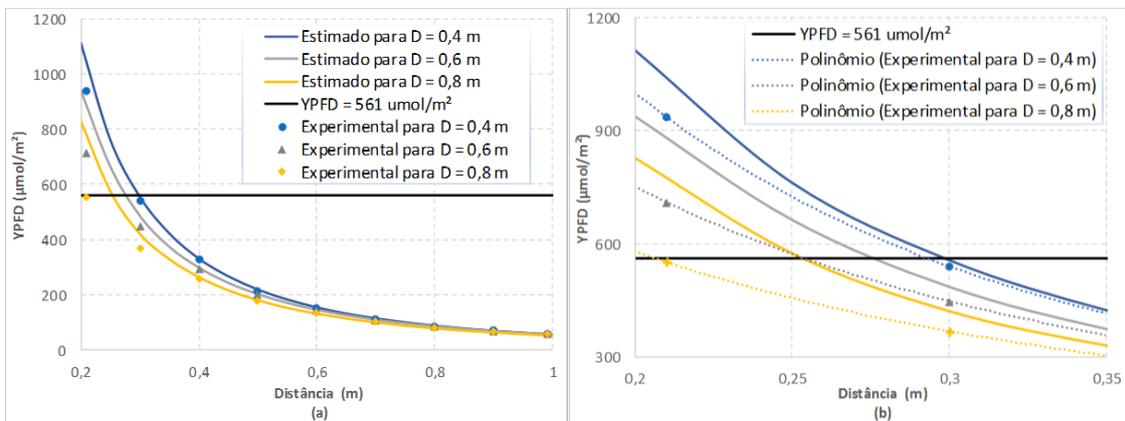


Figura 37. A) Comparação de resultados da luminária RB por estimação e por experimento de densidade de fluxo YPFD em função de distância para três diâmetros de dossel diferentes. B) Resultados ampliados na região do YPFD desejado ($561 \mu\text{mol}/\text{m}^2$).

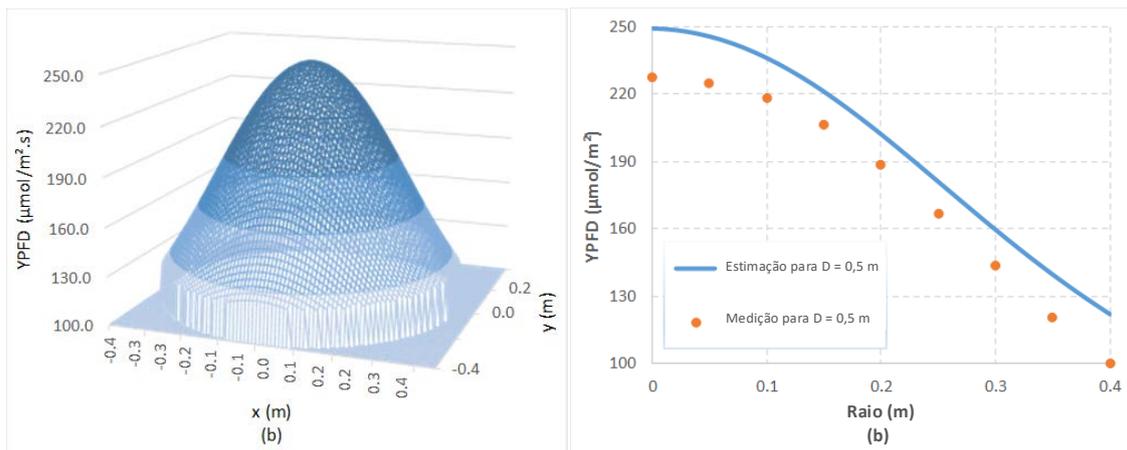


Figura 38. (a) Distribuição da densidade de fluxo calculado em disposição tridimensional e (b) corte transversal de densidade de fluxo calculado em comparação com o medido em função do raio. Plano de 0,8 m de diâmetro e altura de 50 cm para luminária RB.

3.3 Considerações finais do capítulo

O ramo de iluminação artificial com emprego na agricultura está sob forte expansão devido ao domínio atual da tecnologia LED no mercado. O capítulo mostra as vantagens dessa iluminação que confere viabilidade comprovada de aplicação para horticultura em comparação com os demais tipos de iluminação artificial. A iluminação a LED se destaca das demais, principalmente, pela sua elevada eficiência fótica e, no contexto vegetal, elevada eficácia fitométrica ($\mu\text{mol/W}$). Também apresenta superioridade pelo aspecto de longa vida útil, robustez, tamanho reduzido e emissão direcionada de radiação. Sua principal desvantagem ainda é o elevado custo de aquisição, porém, essa característica vem se tornando cada vez menos expressiva como apontado pelos prognósticos futuros de custo do LED e de seu circuito de acionamento.

O projeto da luminária desenvolvida abarcou os estudos de quantificação da densidade de fluxo adequada para o lúpulo, projeto luminotécnico de estimativa de fluxo requerido pela luminária para determinada configuração de sala de crescimento, arranjo e estrutura da luminária, modelagem RET com projeto de dissipador e suas respectivas validações por comparação com resultados experimentais.

Foram propostos três métodos para a quantificação de densidade de fluxo adequada para o lúpulo por carência bibliográfica de estudos no tema. O primeiro método baseou-se na manipulação dos dados de radiação característicos de latitudes com maior sucesso no cultivo da espécie tratada como referência para determinação de YPFD médio instantâneo diário para cada regime de fotoperíodo mensal. O segundo método baseou-se na medição do estresse de YPFD nas folhas das plantas com o emprego do IRGA para obtenção de YPFD ótimo de aproveitamento fotossintético mediante a curva de eficiência fotossintética, também fornecida pelo aparelho. Porém, esse método é dependente das variações morfológicas da folha e, portanto, válido para um determinado cenário de radiação associado ao mês em questão. Para os demais meses, a execução da rotina com o IRGA novamente é necessária para determinar o novo ponto ótimo. Mediante a isso, o terceiro método conciliou os dois métodos anteriores pela estipulação de uma razão fixa entre o ponto ótimo encontrado pelo IRGA e a média mensal do habitat encontrado pelo primeiro método. Dessa forma, foi encontrado o YPFD máximo de $561 \mu\text{mol/m}^2$ que a luminária deve desempenhar referente ao mês de maior insolação do ano.

O projeto luminotécnico de estimativa de fluxo da luminária tomou por base os parâmetros de YPFD ótimo encontrado para o lúpulo, sua área de dossel e a distância mínima entre a luminária e a planta atentando à manutenção de temperaturas seguras sobre o dossel para não danificar o tecido foliar. Pelo equacionamento desenvolvido encontrou-se a correlação entre a distância e o YPF para diferentes áreas de dossel e YPF constante com aplicação da luminária COB APOLLO 600. Optou-se pelos experimentos iniciais com essa luminária pela sua característica pontual e elevado fluxo, aumentando a flexibilidade de ajuste de distância no projeto. O número de LEDs da luminária foi determinado observando o comportamento de estimativa de fluxo YPF determinado na sessão anterior e sua proporção espectral vermelho/azul tomando por base bibliográfica. Os canais foram separados por cor (modelo) de LED em um arranjo em série, visando controle mais efetivo do espectro e do fluxo. O layout da placa com posicionamento dos canais e distanciamento de LEDs foi feito atentando para um maior efeito dissipativo e para a uniformidade de fluxo pela luminária. Um fluxograma da metodologia de projeto de luminária adotada é apresentado na sessão de Anexo, ao final desse trabalho.

O modelo PET (adaptação RET) foi discutido segmentando sua base conceitual por cada aspecto envolvido (elétrico, térmico e radiométrico) e identificando a correlação entre eles. Neste contexto, foi feita a modelagem RET para cada canal da luminária de maneira a tentar estimar o fluxo por canal mediante a um modelo caixa branca, sem a necessidade de medição da temperatura do sistema, obtendo-a indiretamente através de cálculos utilizando parâmetros elétricos de medição (corrente e tensão do canal) e k_v por folha de dados.

A validação do projeto se iniciou com o experimento de aferição da temperatura da placa e temperatura de junção com o emprego de um termovisor sobre a resistência de projeto do dissipador. Para esse primeiro experimento pode-se observar que, aplicando um dissipador de resistência próxima a projetada, a temperatura dos LEDs excedeu pela aferição em mais de 20 °C do valor da temperatura estimado, havendo necessidade da inserção de ventilação forçada para incrementar o efeito dissipativo, conseqüentemente melhorando o desempenho do fluxo. O segundo experimento foi de cunho teórico, a partir da simulação em *software* do circuito equivalente eletrotérmico da modelagem RET da luminária. Os resultados de simulação mostraram respostas condizentes de interação

térmica e radiométrica entre canais como relatado neste capítulo. Assim, como controlabilidade indireta de fluxo mediante controle de corrente de cada canal.

O experimento para validação RET foi feito a partir de medições térmicas e radiométricas envolvendo o arranjo experimental com uma Esfera Integradora para três ensaios diferentes. Os resultados da comparação por erro entre os valores experimentais (medidos) e os teóricos (calculados) para cada ensaio foram sumarizados na Tabela 6. Pela tabela, pôde-se observar com clareza que ambos os métodos de estimativa de fluxo por cálculo da temperatura de junção possuem erros julgados aceitáveis. Portanto, a modelagem RET é validada para os cenários com e sem ventilação forçada, para estimativa do fluxo total e por canal, permitindo dessa forma o recurso da manipulação espectral concisa pelo sistema. Ainda pela tabela, pode-se observar que os erros do método proposto pelo cálculo da temperatura de junção pela equação (3.16) são menores, de forma geral, que os erros provenientes do método direto com medição da temperatura ou com o cálculo da temperatura pela equação (3.15). Isso se deve a dificuldades na aquisição da temperatura uniforme na placa e na suscetibilidade de erros na medição decorrente de impurezas e complexidade de plena anexação do sensor de termopar ao contato da placa. O método de cálculo pela equação (3.15) também fica suscetível a erros por conta da estipulação de valores de resistência térmica do sistema. Com isso, pode-se concluir que o método proposto de estimativa de fluxo pela equação (3.16) não só apresenta menor complexidade prática de implementação e menor custo, como apresenta também estimativas com melhor exatidão em uma região maior de operação.

Por fim, se realizou a validação da estimativa da densidade de fluxo pelo arranjo experimental utilizando um difusor cossenoidal anexado a um plano com tamanho e altura regulável confinados à uma câmara escura (sem interferências de iluminação do meio externo). Esse experimento foi comparado com a modelagem pontual proposta tanto para um modelo de LED com caracterização pontual (COB LED APOLLO 600), quanto para o protótipo desenvolvimento para atendimento das plantas de lúpulo (luminária RB). Pode-se concluir que o método também se aplica a luminárias com arranjos matriciais em dimensões relativamente pequenas se comparadas ao plano irradiado e a distância entre os dois. Porém, erros ainda relevantes foram mais perceptíveis para a luminária Apollo, evidenciando possíveis parcelas de irradiação difusa (indireta) somada ao plano já que a estrutura não apresentava reflexão desprezível (câmara não plenamente escura). Trabalhos futuros visam o aperfeiçoamento do modelo para redução de erros de estimativa

e aplicação generalista da luminária, considerando a contribuição da radiação indireta incidente (proveniente de reflexões em estruturas), sua disposição física, podendo estar deslocada do ponto de referencial central de irradiação, e seu arranjo (pontual, linear e matricial).

4. Conclusões e propostas para trabalhos futuros

O presente trabalho reuniu uma revisão bibliográfica extensa caracterizando o estado da arte de pesquisas relacionadas ao cultivo de plantas sob iluminação artificial. Com isso observou-se que ainda há um déficit expressivo com relação a pesquisas atreladas a engenharia elétrica, envolvendo o desenvolvimento de luminárias e circuitos de acionamento nesse contexto.

Pode-se identificar que os principais temas trabalhados referentes à relação entre as plantas e a radiação são: o fotoperíodo, o espectro eletromagnético e a “intensidade” (densidade de fluxo). Esses fatores foram tratados como diretrizes na definição do escopo de desenvolvimento da luminária. A mesma foi desenvolvida empregando dois canais de LEDs, incluindo uma proporção vigente pela bibliografia e flexível a ponto de permitir estudos futuros com diferentes proporções espectrais para diferentes espécies de planta. A faixa de emissão no espectro eletromagnético foi focada nas regiões de maior produtividade fotossintética, garantindo maior eficiência da luminária sem comprometer as necessidades fisiológicas da planta. Por fim, o número de LEDs foi definido a partir de uma estimativa feita para atingir uma determinada densidade de fluxo julgada suficiente para atender a uma planta de lúpulo em fase adulta.

Dentre os três temas abordados na segmentação bibliográfica, o menos explorado é o quesito da quantificação da radiação, ou, densidade de fluxo. Sabe-se que a planta possui um potencial de plasticidade pela qual se adapta a diversos cenários de densidade de fluxo médio diário. Porém, para o sucesso na maximização da eficiência de um sistema de iluminação artificial, é necessário que esse tema seja investigado mais a fundo. Este trabalho propôs três métodos de estimação simplificada da densidade de fluxo requerido pela planta por carências de apontamentos na bibliografia. O terceiro método abordado foi julgado como mais adequado pela consideração da morfologia foliar e um cenário de radiação mais próximo do habitat natural da planta. Foram realizados experimentos de estresse de YFPD e medição da produtividade fotossintética com folhas de lúpulo para

encontrar um ponto ótimo de máxima eficiência para os cenários estabelecidos (menor consumo de energia elétrica e menor potência instalada de iluminação para maiores níveis de taxa fotossintética). É importante ressaltar que este método ainda deve ser refinado na tentativa de estimar o real ponto ótimo de produtividade em sala de crescimento, aplicado com um grupo maior de folhas e indivíduos em um cenário mais uniforme da temperatura e umidade atmosférica. Para estudos futuros no tema se objetiva manter o grupo em estudo (seis exemplares de lúpulo) em câmara escura, climatizada, no intuito de refinar a metodologia de estimação do ponto ótimo de produção fotossintética, com a validação empírica da produção de massa verde, de cones e pela concentração de ácido *alpha* nos mesmos.

Outro fator a ser destacado no estado da arte sobre o assunto é o sistema quântico fitométrico. Esse sistema se mostrou o mais adequado para retratar a ótica vegetal no sentido de quantificação da radiação destinada à produção fotossintética pela planta. O sistema fitométrico, ainda se comparado com o sistema quântico PAR, apresenta-se mais adequado por considerar um intervalo mais abrangente do espectro eletromagnético e ponderar o valor energético inerente a cada comprimento de onda. Portanto, a unificação da quantificação de fluxo e da densidade de fluxo por esse sistema deve ser adotada. Parte da bibliografia não indexa qual sistema quântico emprega (quântico PAR ou fitométrico) e, por ambos sistemas apresentarem mesmas grandezas e unidades, fica dúvida a informação apresentada, dificultando o projeto de luminárias. Outra alternativa seria informar os parâmetros pelo sistema radiométrico. Assim, toda e qualquer informação de radiação poderia ser convertida para o sistema fitométrico por meio das equações apresentadas nesse trabalho.

A escolha por uma luminária LED se deu devido às várias vantagens que a mesma apresenta em comparação com outros tipos de iluminação. O texto apresenta o estado da arte dos tipos de iluminação aplicados no cultivo de plantas. Pode-se concluir que os LEDs são mais adequados para aplicação nesse contexto, mesmo ainda apresentando custos mais elevados por fluxo gerado. As principais vantagens que garantem sua adequação são a longa vida útil, a elevada eficiência fótica, convertendo uma maior parcela da energia elétrica em radiação, o fluxo direcionado, apresentado menores perdas de fluxo para regiões periféricas (fora do alvo de irradiação) e a elevada eficácia

fitométrica, emitindo radiação apenas em intervalos espectrais com melhor aproveitamento para a atividade fotossintética.

Diante da estrutura da luminária desenvolvida, foi adicionado ventiladores para incremento do sistema de dissipação com o intuito de atingir maiores níveis de fluxo, evitando degradações significativas por conta da temperatura de trabalho, conforme observado em testes empíricos na Esfera Integradora. Com o modelo experimental da luminária, pôde-se também validar a caracterização radio-eleto-térmica do arranjo de LEDs azuis e vermelhos, com erros relativamente baixos para condições com e sem ventilação forçada. Isso evidencia que a modelagem proposta pode ser usada com a finalidade de simplificação do sistema de medições, controle de fluxo e proporção espectral, já que o fluxo da luminária é obtido de forma indireta, por estimação, e apenas por aquisição de parâmetros elétricos de tensão e corrente de cada canal. É importante ressaltar que o trabalho foi realizado para uma validação generalizada, utilizando o sistema radiométrico. Portanto, o recurso de controle de fluxo de forma indireta pode ser adotado para demais sistemas de acionamento de luminárias que objetivam a simplificação do conjunto de controle empregado e a redução de custo da topologia. Para melhor adequação ao cenário aplicado nesse trabalho, a modelagem feita passa por uma simples conversão de fluxo radiométrico para fluxo fitométrico (YPF).

Outro método de validação empregado foi o da estimativa de densidade de fluxo de incidência direta. Os *softwares* dedicados a projetos luminotécnicos ainda não apresentaram suporte para o sistema fitométrico. Portanto, identificou-se a necessidade dos cálculos de densidade de fluxo e, conseqüentemente, fluxo necessário que a luminária deve desempenhar. Atentando-se para esse parâmetro, escolheu-se o número de LEDs empregados na luminária prototipada (Luminária RB). Além disso, os testes também foram elaborados com uma luminária dedicada à iluminação de ambientes urbanos (APOLLO 600). Pode-se observar pela comparação dos dois modelos de luminárias empregados uma maior eficácia fitométrica da luminária RB em relação a luminária APOLLO, como já esperado. Além disso, o estudo de estimação de fluxo para ambas se apresentou válido para o meio de consideração de radiação direta. Porém, para uma modelagem mais realista, deve-se considerar também os índices de reflexão da radiação indireta na superfície de interesse. Sendo assim, tem-se como sugestão para trabalhos futuros o aumento da complexidade do modelo de estimação de densidade de fluxo

considerando o cálculo para radiações diretas e indiretas incidentes na superfície, além do tratamento de fontes de radiação matricial. Isso deve ser implementado no desenvolvimento de um código para facilitação do tratamento de dados e geração de resultados de projeto.

Como trabalhos futuros se espera, também, a integração entre a modelagem RET e os cálculos de densidade de fluxo e a produção fotossintética das plantas, de maneira que se obtenha uma relação aproximada por um método caixa cinza dos parâmetros elétricos de cada canal e a respectiva produção fotossintética. Essa análise mais pragmática é suscetível às variações morfológicas das plantas e das demais variáveis apontadas no texto, porém, pode ser o passo inicial de estimativa de produção fotossintética na ausência de equipamentos de medição radiométrica e de produção fotossintética como suporte para estabelecimento do projeto de luminárias para salas de crescimento.

Por fim, outra proposta de trabalho futuro seria voltada ao desenvolvimento de um circuito de acionamento para a luminária prototipada e demais luminárias vigentes com possibilidade de aplicação em sala de crescimento e estufas. Deve-se fazer uma pesquisa para se encontrar a topologia mais adequada pelos critérios de custo, flexibilidade de implementação e adequação a luminária prototipada, assumindo os recursos de dimerização independente de canais, controlabilidade de fluxo e temporização programada para emulação de fotoperíodos diferentes. Com isso, se aumenta o número de recursos disponíveis para exploração de estudos em fisiologia vegetal, envolvendo análises de produção em meio a cultivos com suplementação luminosa, espectro efetivo para crescimento vegetativo e para floração, estímulos à produção por mudanças na densidade de fluxo e composição espectral, entre outros estudos pertinentes para a área.

5. Referências bibliográficas

ALBRIGHT, L. D., BOTH, A. J. & CHIU, A. J., 2000. Controlling greenhouse light to a consistent daily integral. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 43(2), pp. 421-431.

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

ALMEIDA, P. S., 2014. *Síntese de conversores ressonantes com alto fator de potência e alta eficiência para o acionamento de diodos emissores de luz*. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora.

ALMEIDA, P. S. et al., 2011. An experimental study on the photometrical impacts of several current waveforms on power white leds. *Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pp. 728-733.

ALMEIDA, P. S. et al., 2015. Static and dynamic photoelectrothermal modeling of led lamps including low-frequency current ripple Effects. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(7), pp. 3841-3851.

ALMEIDA, P. S. et al., 2011. A novel method of current equalization in LED strings based on simple linear circuit. *Industrial Electronics (ISIE), IEEE International Symposium*.

BARNES, C. et al., 1993. Accuracy of quantum sensors measuring yield photon flux and photosynthetic photon flux. *HortScience*, 12(28), pp. 1197-1200.

BARTH, H. J., KLINE, C. & SCHMIDT, C., 1994. The hop atlas: The history and geography of the cultivated plant. *Nurenberg, Joh. Barth & Sohn*.

BENDER, V. C., 2012. *Metodologia de projeto eletrotérmico de leds aplicada ao desenvolvimento de sistemas de iluminação pública*. Santa Maria (RS): Universidade Federal de Santa Maria.

BENDER, V. C. et al., 2013a. Design methodology for light-emitting diode systems by considering an electrothermal model. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 60(11), pp. 3799-3806.

BENDER, V. C. et al., 2013b. Electrothermal methodology applied to flicker analysis in off-line led systems. *IEEE International Conference on Industrial Electronics (IECON)*.

BJÖRKMAN, O. & DEMMIG, B., 1987. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77K among vascular plant of diverse origins. *Planta*, 170(4), pp. 489-504.

BROWN, C. S., SCHUERGER, A. C. & SAGER, J. C., 1995. Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red Lighting. *Society for Horticultural Science*, 120(5), pp. 808-813.

- CHEN, Z. Y. et al., 2011. A mathematical model for describing light-response curves in *Nicotiana tabacum* L.. *Photosynthetica*, 49(3), p. 467.
- CHRISTOPHE, A., MOULIA, B. & VARLET-GRANCHER, C., 2006. Quantitative contributions of blue light and par to the photocontrol of plant morphogenesis in *Trifolium repens* (L.). *Journal of Experimental Botany*, 57(10), pp. 2379-2390.
- CIE, 1993. Terminology for photosynthetic active radiation for plants. *CIE collection in Photobiology and Photochemistry*, Issue 8, pp. 42-46.
- COATON, J. R. & MARSDEN, A. M., 2012. *Lamps and lighting*. 4^a ed. Nova York: Routledge.
- COSTA, G. J., 2006. *Iluminação econômica: Cálculo e avaliação*. Porto Alegre: EDIPUCRS.
- COSTA, G. J. C. & CUELLO, J. L., 2013. The phytometric system: A new concept of light measurement for plants. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Volume 33:1, pp. 34-42.
- CRAIN, M. N., 2011. *Factors controlling hop flowering and their potential for use in the brewing and pharmaceutical industries*. Waterloo: University of Northern Iowa.
- DA COSTA, G. J. & CUELLO, J. L., 2004. The phytometric system: A new concept of light measurement for plants. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 33, pp. 34-42.
- DIAS, M.P. *Avaliação do emprego de um pré-regulador boost de baixa frequência no acionamento de LEDs de iluminação*. 29 de ago. de 2012. 94 folhas. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais. 2012.7.
- EDGAR, R. S. et al., 2012. Peroxiredoxins are conserved markers of circadian rhythms. *Nature*, Volume 485, pp. 459-464.
- FLIP-CHIP-OPTO, 2016a. Led flip chip cob module - Apollo 600, San José - USA: s.n.
- FLIP-CHIP-OPTO, 2016b. [Online] Disponível em: <http://www.flipchipopto.com/> [Acesso em 2016].
- FLUKE CO., 2012. Performance series thermal imagers Ti90-125: Manual do Usuário, Everett: Fluke Corporation.
- G03 COMMITTEE, 2012. Tables for reference solar spectral irradiances: Direct normal and hemispherical on 37 tilted surface. s.l.:ASTM International.
- GACIO, D. et al., 2012. Effects of the junction temperature on the dynamic resistance of white leds. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 1708-1715.
- GILMANOV, T. G. et al., 2007. Partitioning european grassland net ecosystem CO₂ exchange into gross primary productivity and ecosystem respiration using light response function analysis. *ScienceDirect*, Volume 121, pp. 93-120.
- GUPTA, S. D., 2017. *Light emitting diodes for agriculture: Smart lighting*. Kharagpur: Springer.
- HARUN, A. N., AHMAD, R. & MOHAMED, N., 2015. Plant growth optimization using variable intensity and far red led treatment in indoor farming. *International Conference on Smart Sensors and Application (ICSSA)*. *IEEE*, pp. 92-97.

- HERNANDEZ, R. & KUBOTA, C., 2015. Physiological, morphological, and energy-use efficiency comparisons of led and hps supplemental lighting for cucumber transplant production. *HortScience*, 50(3), pp. 351-357.
- HIERONYMUS, S., 2012. For the love of hops: The practical guide to aroma, bitterness and the culture of hops, Boulder, CO: *Brewers Publications*.
- HOGEWONING, S. W. et al., 2012. Photosynthetic quantum yield dynamics: From photosystems to leaves. *The Plant Cell*, 24(5), pp. 1921-1935.
- HUI, R., 2017. *Photo-electro-thermal theory for led systems: Basic theory and applications*. Londres: Cambridge University Press.
- HUI, S. Y. & QIN, Y. X., 2009. A general photo-electro-thermal theory for light emitting diode (LED) systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(8), pp. 1967-1976.
- IHGC, 2016. International Hop Growers' Convention. [Online] Available at: <http://www.hmeljgiz.si/ihgc/doc/2016%20NOV%20%20IHGC%20hop%20variety%201ist.pdf> [Acesso em 20 Dezembro 2017].
- INMET, 2017. Dados climatológicos de juiz de fora. Brasília: s.n.
- JUNIOR, S., 2010. *Estudo de estruturas de reatores eletrônicos para leds de iluminação*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.
- JUNTUNEN, E. et al., 2012. Thermal performance comparison of thick-film insulated aluminum substrates with metal core pcbs for high-power led modules. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2(12), pp. 1957-1964.
- KIM, H. H. et al., 2004. Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red and blue leds. *HortScience*, Volume 39, pp. 1617-1622.
- KIM, M. H. et al., 2007. Origin of efficiency droop in GaN-based light-emitting diodes. 18 ed. s.l.:s.n.
- KING, R., 2006. Light-regulated plant growth and flowering; from photoreceptors to genes, hormones and signals. *Acta Horticulturae (ISHS)*, Volume 711, p. 234.
- KNEEN, R., 2003. Small scale and organic hops production. [Online] Available at: <http://www.crannogales.com/HopsManual.Pdf> [Acesso em 2017].
- LANGE, O. L., et al., 2012. Physiological plant ecology I- responses to the physical environment. Nova Iorque: *Springer Science & Business Media*.
- LECLAIRAGE, 1993. Terminology for photosynthetic active radiation for plants. 106(8).
- LEDINSIDE, 2017. Ledinside market intelligence and consulting service, *Beijing: LEDinside Research Team*.
- LICOR CO., 2015. [Online] Available at: <https://www.licor.com/env/products/photosynthesis/LI-6400XT/> [Acesso em Agosto 2018].
- LI, Y. et al., 2012. Effect of led supplemental illumination on the growth of strawberry plants. *Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPO)*. *IEEE*, pp. 1-4.
- MARTYNHAK, B. J., BACK, F. A. & LOUZADA, F., 2012. O valor biológico do período circadiano. *Revista da Biologia*.
- MASSA, G. D., et al., 2008. Plant productivity in response to led lighting. *HortScience*, 43(7), pp. 1951-1956.

- McCREE, K. J., 1972. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agricultural Meteorology, Issue Elsevier*, pp. 443-453.
- MIGUENS, A. P., 1999. *Navegação: A Ciência e a Arte - Navegação Astronômica e Derrotas*. Rio de Janeiro: DHN.
- MURCHIE, E. H. & HORTON, P., 1997. Acclimation of photosynthesis to irradiance and spectral quality in british plant species: chlorophyll content, photosynthetic capacity and habitat preference. *Plant, Cell and Environment*, Volume 20, pp. 438-448.
- MURDOCH, J. B., 1985. *Illumination engineering - from Edison's lamp to the laser*, Nova Iorque: Macmillan Publishing Co.
- NATIONAL FRAMEWORK FOR ENERGY EFFICIENCY, 2009. Training guide: The basics of efficient lighting. brisbane: s.n.
- NELSON, J. A. & BUGBEE, B., 2014. Economic analysis of greenhouse lighting: light emitting diodes vs. high intensity discharge fixtures. *Plos One*, 9(6), p. 99010.
- NHUT, D. T. et al., 2000. Growth of banana plantlets cultured in vitro under red and blue light-emitting diode (led) irradiation source. *International Symposium on Tropical and Subtropical Fruits 575*, pp. 117-124.
- NHUT, D. T. et al., 2003. Responses of strawberry plantlets cultured in vitro under superbright red and blue light-emitting diodes (leds). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 73(1), pp. 43-52.
- OSRAM Opto Semiconductors, 2016a. OSRON SSL 120 GD CSSPM1.14, Munique: s.n.
- OSRAM Opto Semiconductors, 2016b. OSRON SSL 120 GD CSSPM1.24, Munique: s.n.
- PALMA, J. M. et al., 2015. Physiology of pepper fruit and the metabolism of antioxidants: chloroplasts, mitochondria e peroxisomes. *Annals of Botany*, Volume 116, pp. 627-636.
- PEARSON, B. J., Smith, R. M. & CHEN, J., 2016. growth, strobile yield and quality of four humulus lupulus varieties cultivated in a protected open-sided greenhouse structure. *American Society for Horticultural Science*, Volume 51.
- PEREIRA, A. R., ANGELOCCI, L. R. & SENTELHAS, P. C., 2007. *Meteorologia agrícola - Revista Ampliada*. Piracicaba: Universidade de São Paulo.
- PHILIPS LIGHTING, 2015. *Light recipes for horticulture*, s.l.: Philips Horticulture LED Solutions - General booklet.
- PINHO, P., 2008. *Usage and control of solid-state lighting for plant growth*. Espoo: Helsinki University of Technology.
- PRENCIPE, F. P. et al., 2014. Development of a new high-performance liquid chromatography method with diode array and electrospray ionization-mass spectrometry detection for the metabolite fingerprinting of bioactive compounds in *Humulus lupulus* L.. *Journal of Chromatography A.*, Volume 1349, pp. 50-59.
- REI DOS DISSIPADORES, 2016. *Rei dos dissipadores*. [Online] Available at: <http://www.reidosdissipadores.com.br/grandes/rdd-17232/dissipador-de-calor-rdd-17232-80> [Acesso em 2016].
- RUNKLE, E. S. & HEINS, R. D., 2001. Specific functions of red, far red, and blue light in flowering and stem extension of long-day plants. *Society for Horticultural Science*, 126(3), pp. 275-282.

- SIMPSON, R., 2003. *Lighting control - Technology and Applications*. Oxford: Focal Press.
- SCHUBERT, E. F., 2003. *Light-emitting diodes*. Cambridge: Cambridge University Press.
- SHIMADA, A., TANIGUCHI, Y., 2011. Red and blue pulse timing control for pulse width modulation light dimming of light emitting diodes for plant cultivation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, v. 104, n. 3, p. 399-404.
- SIMONS, R. H. & BEAN, A. R., 2001. *Lighting engineering - Applied calculations*. s.l.:Routledge.
- SINGH, D., et al., 2015. Leds for energy efficient greenhouse lighting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 49, pp. 139-147.
- TAIZ, L. et al., 2014. *Plant physiology*. Oxford University Press.
- TAIZ, L. & ZEIGER, E., 2009. *Fisiologia vegetal*. PortoAlegre: ARTMEDEDITORA.
- TAKAYAMA, K. et al., 2009. Chlorophyll fluorescence imaging for health condition monitoring of tomato plants in greenhouse. International Symposium on High Technology for Greenhouse Systems: *GreenSys2009* 893, pp. 333-340.
- TAO, X. H., LI, S. N. & HUI, S. Y. R., 2010. Estimation of internal junction temperature & thermal resistance of light-emitting diodes using external luminous flux measurements. *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 179-183.
- TAVARES, P. L. et al., 2017. Led system with independent red and blue channels employing radiant flux estimation and indirect flux control for greenhouse hop cultivation. *Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pp. 1-9.
- TAVARES, P. L. et al., 2018a. An analytical method of led lighting design for greenhouses with photosynthetic flux density prediction. *Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, pp. 1-7.
- TAVARES, P. L. et al., 2018b. Comparison of analytical method of flux density prediction for COB and discrete LED luminaires. *IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, pp. 1-8.
- THOMAS, G. G. & SCHWABE, W. W., 1969. Factors controlling flowering in the hop. *Annals of Botany London*.
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2016. *Solid-state lighting research and development plan*, Washington, DC: s.n.
- VAN IERSEL, M. W. & GIANINO, D., 2017. An adaptive control approach for light-emitting diode lights can reduce the energy costs of supplemental lighting in greenhouses. *HortScience*, 52(1), pp. 72-77.
- VAN STRATEN, G. et al., 2010. *Optimal control of greenhouse cultivation*. s.l.:CRC press.
- VARGA, K. E., 2017. *GreenHouse management*. [Online] Available at: <http://www.greenhousemag.com/article/led-lighting-research-summit-2017/>[Acesso em 10 Setembro 2017].
- VAYOLA, 2018. *Professional led grow lights*, Helsinki: s.n.

YORIO, N. C. et al., 2001. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (leds) with blue light supplementation. *HortScience*, pp. 380-383.

6. Anexo – Fluxograma de projeto de luminária voltada ao cultivo de plantas

