



Universidade Federal de Juiz de Fora
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica

Camila do Carmo Almeida

Sistema Eletrônico baseado em diodos emissores de luz (LEDs) para aplicação em
estudos de Fisiologia Vegetal

Dissertação de Mestrado

Juiz de Fora
2014

Camila do Carmo Almeida

Sistema Eletrônico baseado em diodos emissores de luz (LEDs) para aplicação em estudos de Fisiologia Vegetal

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, área de concentração: Sistemas Eletrônicos, da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.

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

Juiz de Fora
2014

Camila do Carmo Almeida

Sistema Eletrônico baseado em diodos emissores de luz (LEDs) para aplicação em estudos de Fisiologia Vegetal

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, área de concentração: Sistemas Eletrônicos, da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.

Aprovada em 29 de Agosto de 2014.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Henrique Antônio Carvalho Braga, Dr.Eng.

Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF

Orientador

Prof. Tiago Bandeira Marchesan, Dr.Eng.

Universidade Federal de Santa Maria, UFSM

Prof. Paulo Henrique Pereira Peixoto, D.Sc.

Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF

Prof. Pedro Gomes Barbosa, D.Sc.

Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF

Aos meus pais, pelo amor e por sempre acreditarem nas minhas capacidades.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por nunca ter deixado sentir-me só nesta caminhada.

Ao meu pai Cacau pelo exemplo de humildade, amor, carinho e coragem.

À minha mãe Sônia pelo amor imensurável e por sempre me apoiar e acreditar nas minhas capacidades.

Às minhas irmãs Carla e Larissa pela amizade, apoio e alegria constante em minha vida.

Ao meu namorado José pelo incentivo, apoio, amor e companheirismo.

Ao professor Henrique A. C. Braga, pelo incentivo e atenção durante esse trabalho, pela amizade, respeito e confiança depositada em mim.

À banca examinadora que se propôs a analisar este documento.

Aos amigos e colegas, do NAEP, Pablo Furtado, Pedro Machado, do LAPTEL, Leandro Manso, José Abritta, Henrique Monteiro, Igor Abritta, Davis e do NIMO, Alcindo Gandhi, Pedro Almeida, Guilherme Márcio, Ícaro, Vinicius, Fernando, Casagrande, em especial à Milena Faria e Marcos Fidelis por todo companheirismo envolvendo este trabalho.

Ao Nicolas Monteiro, por ter doado seu pouco tempo de vida na concretização e aperfeiçoamento desta dissertação, contribuindo com seus conhecimentos na área de biologia.

Ao Pierre do Label, agradeço pelo suporte técnico.

Agradeço também e principalmente aos amigos Carlos Henrique Martins e Rodolfo Lacerda que muito colaboram com a construção prática deste trabalho.

Agradeço ao Professor David S. A. de Gouvêa, que se dispôs a nos ajudar sempre que se fez necessário.

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

O saber a gente aprende com os mestres e os livros. A sabedoria, se aprende é com a vida e com os humildes.

Cora Coralina

RESUMO

Este trabalho teve por objetivos projetar um sistema eletrônico de controle destinado a fornecer uma alternativa simplificada e eficiente para estudos de fisiologia vegetal envolvendo luz artificial, bem como para sua utilização em determinados processos de cultivo de plantas em estufas. O trabalho apresenta uma revisão sobre a interação entre a iluminação artificial e o cultivo de plantas, tanto para o propósito de uma cultura comercial quanto para possibilitar a interpretação do comportamento de plantas em estudos botânicos. Este sistema eletrônico possibilita a determinação das quantidades radiométricas de interesse quando a iluminação artificial é usada como suplemento ou como única fonte de iluminação em cultivos. Com base em estudos anteriores, é proposto a produção de um sistema autônomo constituído por um aparelho de iluminação composto por LEDs brancos e/ou coloridos. Além disso, foram realizados alguns experimentos radiométricos preliminares utilizando luminárias comerciais de LEDs, visando sua utilização em associação com o sistema de controle proposto. Os parâmetros medidos mais relevantes foram o fluxo de fótons fotossinteticamente ativos, fluxo luminoso e a temperatura de cor correlata. Espera-se que o protótipo desenvolvido apresente características que agreguem flexibilidade e comportamento radiométrico relevante para cultivos controlados.

Palavras - Chave: Iluminação Artificial. Quantidades Radiométricas. Diodos Emissores de luz. Fluxo de Fótons Fotossinteticamente Ativo.

ABSTRACT

This work aims to develop an electronic control system with the purpose to drive a simplified and efficient alternative for vegetal physiology studies involving artificial light as well as for its utilization in certain plants crop at greenhouses. Additionally, this work presents a brief review regarding the interaction between artificial lighting and plants, with purposes of commercial crops and the possibility of interpretation of plants behavior in botanic studies. This electronic system enables the determination of the radiometric quantities of interest when the lighting is used as a supplement or as the only lighting source in crops. Using the latest studies, it is proposed an autonomous system consisting basically of white and/or colored LEDs. Besides, it were performed radiometric experiences using commercial luminaires with LEDs aiming the use of them in the proposed control system. The more relevant measured parameters were the photosynthetic photon flux, luminous flux and correlated colour temperature. The proposed system shows flexibility and relevant radiometric behavior, which are particularly useful in Plant Physiology.

Keywords - Artificial lighting. Radiometric Quantities. Light Emitting Diodes. Photosynthetic Active Photon Flux .

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Polarização direta (BENDER, 2012).	21
Figura 2	LEDs indicativos (CORDEIRO, 2014).	22
Figura 3	LEDs de alto brilho (CORDEIRO, 2014).	22
Figura 4	LEDs de potência com diferentes encapsulamentos. (a) Bridgelux (b) Philips Lumileds (c) Cree (d) Osram (e) Seoul (g) Samsung (BENDER, 2012).	23
Figura 5	Efeito da temperatura de junção em um LED Luxeon K2 operando com uma corrente de 1,5 A (LUMILEDS, 2010).	24
Figura 6	Efeito dos níveis de corrente na vida útil de um LED Luxeon K2 (LUMILEDS, 2010).	24
Figura 7	Modelo elétrico linear equivalente dos LEDs.	25
Figura 8	Comparação entre a sensibilidade da luz do olho humano (Visão Fotópica, CIE 1978) e das plantas superiores (ALMEIDA et al., 2014).	30
Figura 9	Lâmpada incandescente (GROWINGLIGHTS, 2012).	31
Figura 10	Exemplo de lâmpadas fluorescente (GROWINGLIGHTS, 2012).	32
Figura 11	Lâmpadas fluorescentes no crescimento de vegetais (GROWINGLIGHTS,	

	2012).	33
Figura 12	Lâmpada HPS (GROWINGLIGHTS, 2012).	34
Figura 13	Lâmpadas HPS no crescimento de vegetais (GROWINGLIGHTS, 2012).	34
Figura 14	Lâmpadas de LEDs no crescimento de vegetais (GROWINGLIGHTS, 2012).	35
Figura 15	Estufa no sul da Finlândia (PINHO T. ROSVALL & HALONEN, 2008).	36
Figura 16	Vista panorâmica de dois dos blocos de crescimento composto de luminárias LED (à esquerda) e luminárias de sódio de alta pressão (à direita) (PINHO T. ROSVALL & HALONEN, 2008).	36
Figura 17	Fotossíntese (BIOGEO, 2012).	37
Figura 18	Taxa relativa de fotossíntese relacionada à absorção em diferentes comprimentos de onda de luz (LODISH, 2012).	39
Figura 19	Curvas de resposta quântica ideais e a curva RQE (COSTA, 2006).	40
Figura 20	Representação esquemática da "caixa preta" (ALMEIDA et al., 2014).	46
Figura 21	Equipamentos necessários para medições PAR (ALMEIDA et al., 2014).	47
Figura 22	Luminária Nichia LEDs.	48
Figura 23	Potência espectral radiométrica, obtido experimentalmente.	48
Figura 24	Luminária de LEDs Everlight EHP-AX08EL.	50

Figura 25	Potência espectral radiométrica obtida experimentalmente.	51
Figura 26	Luminária de LEDs Everlight NF2L757ART SW30/P16-V1 - P18/R8000.	52
Figura 27	Potência espectral radiométrica obtida experimentalmente.	53
Figura 28	Luminária de LEDs do fabricante HEXA.	54
Figura 29	Potência espectral radiométrica obtida experimentalmente.	55
Figura 30	Sistema eletrônico proposto (ALMEIDA et al., 2014).	57
Figura 31	Conversor Buck.	59
Figura 32	Controlador por histerese.	60
Figura 33	Dimerização por AM (CORDEIRO, 2014).	61
Figura 34	Dimerização por PWM (CORDEIRO, 2014).	62
Figura 35	Dimerização <i>Bi nível</i> (CORDEIRO, 2014).	63
Figura 36	Esquema do driver dimerizável proposto (ALMEIDA et al., 2014).	64
Figura 37	Modelo empregado na simulação do conversor projetado.	66
Figura 38	Formas de onda da simulação PSIM. De cima para baixo, a corrente do indutor, a corrente nos LEDs e o ciclo de trabalho.	67

Figura 39	Esquemático do sensor de corrente.	68
Figura 40	Esquemático do controlador de histerese.	68
Figura 41	Esquemático do circuito de dimerização.	69
Figura 42	Foto do protótipo do conversor Buck.	70
Figura 43	Tensão (CH1-50 V/div) e corrente nos terminais dos LEDs (CH2-150 mA/div).	71
Figura 44	Tensão nos terminais do diodo (CH1-100V/div), tensão nos terminais MOSFET Q2 (CH2-10V/div) e corrente pelo indutor (CH3-250 mA/div).	71
Figura 45	Tensão nos terminais do diodo (CH1-100V/div), tensão nos terminais MOSFET Q2 (CH2-10V/div) e corrente pelos LEDs (CH3-250 mA/div).	72
Figura 46	Tensão nos terminais do diodo (CH1-100V/div) e corrente pelo interruptor Q1 (CH1-250mA/div).	73
Figura 47	Tensão nos terminais do diodo (CH1-100V/div) e corrente pelo interruptor Q1 (CH1-250mA/div)	73
Figura 48	Ajuste de intensidade luminosa versus iluminância normalizada.	74
Figura 49	Ajuste de intensidade luminosa versus eficiência do conversor.	75
Figura 50	Ajuste de intensidade luminosa versus corrente média.	75

Figura 51	Ajuste de intensidade luminosa versus fluxo luminoso.	76
Figura 52	Ajuste de intensidade luminosa versus nível de PPF.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Cor da luz emitida , Comprimento de onda , Energia de Fóton.	21
Tabela 2	Principais parâmetros da luminária Nichia.	48
Tabela 3	Radiação fotossinteticamente ativa.	49
Tabela 4	Parâmetros do LED Everlight EHP-AX08EL.	50
Tabela 5	Radiação fotossinteticamente ativa.	50
Tabela 6	Parâmetros da luminária de LEDs NF2L757ART SW30/P16-V1 - P18/R8000.	52
Tabela 7	Radiação fotossinteticamente ativa.	52
Tabela 8	Principais parâmetros da luminária Hexa.	54
Tabela 9	Radiação fotossinteticamente ativa.	55
Tabela 10	Parâmetros do projeto do conversor.	65
Tabela 11	Variação de cromaticidade.	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIL Ajuste de Intensidade Luminosa

AM Modulação por Amplitude (do inglês, *Amplitude Modulation*)

ATP Trifosfato de Adenosina (do inglês, *Adenosine Triphosphate*)

CCT Temperatura de Cor Correlata (do inglês, *Correlated Color Temperature*)

CIE Comissão Internacional de Iluminação (do francês, *Commission Internationale de L'Eclairage*)

HB Alto Brilho (do inglês, *High Brightness*)

HPS Lâmpadas de Sódio de Alta Pressão (do inglês, *High Pressure Lamps*)

LEDs Diodos Emissores de Luz (do inglês, *Light Emitting Diode*)

NADP Dinucleótido de Nicotinamida e Adenina (do inglês, *Nicotinamide Adenine Dinucleotide Phosphate*)

NADPH Nicotinamida Adenina Dinucleótido Fosfato (do inglês, *Nicotinamide Adenine Dinucleotide Phosphate-Oxidase*)

NASA Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço (do inglês, *National Aeronautics and Space Administration*)

NIMO-UFJF Núcleo de Iluminação Moderna da Universidade Federal de Juiz de Fora

MOSFET Transistor de Efeito Campo de Metal-Óxido-Semicondutor (do inglês, *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*)

PAR Radiação Fotossinteticamente Ativa (do inglês, *Photosynthetically Active Radiation*)

PPF Fluxo de Fótons Fotossintéticos (do inglês, *Photosynthetic Photon Flux*)

PPFD Densidade de Fluxo de Fótons Fotossintéticos (do inglês, *Photosynthetic Photon Flux Density*)

PWM Modulação por Largura de Pulso (do inglês, *Pulse Width Modulation*)

RGB (do inglês, *Red Green Blue*)

RQE Eficácia Quântica Fotossintética Normalizada (do inglês, *Relative Quantum Efficiency*)

SSL Iluminação de Estado Sólido (do inglês, *Solid State Lighting*)

SUMÁRIO

1	Introdução	20
1.1	Iluminação em Estado Sólido	20
1.1.1	Princípio de Funcionamento dos LEDs	20
1.1.2	Categoria dos LEDs	22
1.2	Características Importantes dos LEDs	23
1.2.1	Vida útil dos LEDs	23
1.2.2	Luz direcionada dos LEDs	25
1.2.3	Modelo Elétrico Linear dos LEDs	25
1.3	Aspectos importantes dos LEDs e suas aplicações	26
1.4	Iluminação Suplementar em Fisiologia Vegetal	26
1.5	Motivações e Objetivos	27
1.6	Estrutura da dissertação	28
2	Luz e Plantas	29
2.1	Introdução	29
2.2	Resumo de estudos de Fisiologia Vegetal	31
2.3	Fotossíntese	37
2.4	Sistemas de Medição de Luz	39
2.4.1	Sistema Radiométrico	41
2.4.2	Sistema Fotométrico	41
2.4.3	Sistema Quântico	42
2.4.4	Sistema fitométrico	43
2.5	Considerações Parciais	43

3	Avaliação de módulos de estado sólido para um crescimento ideal de Plantas	45
3.1	Sistema de Medição para Avaliação dos Módulos de Estado Sólido	45
3.1.1	Teste (1) - Luminária LEDs Nichia NF2L757ART SW30/P16-V1 - P18/R8000	47
3.1.2	Teste (2) - Luminária de LEDs Everlight EHP-AX08EL	49
3.1.3	Teste (3) - Luminária de LEDs Everlight NF2L757ART SW30/P16-V1 - P18/R8000	51
3.1.4	Luminária de LEDs Comercial Hexa	53
3.2	Considerações parciais	56
4	Sistema Eletrônico Proposto	57
4.1	Introdução	57
4.2	Metodologia	58
4.2.1	Conversor Buck	58
4.2.2	Controle por Histerese	59
4.2.3	Dimerização	61
4.2.3.1	Dimerização por Amplitude	61
4.2.3.2	Dimerização por Largura de Pulso	62
4.2.3.3	Dimerização <i>Bi-Nível</i>	62
4.2.4	Conversor Proposto	63
4.3	Simulação do conversor Projetado	65
4.4	Implementação experimental do conversor	67
4.5	Resultados Experimentais obtidos com o protótipo	69
4.6	Considerações Parciais	78
5	Conclusão	80
5.1	Visão Geral da Dissertação	80
5.2	Considerações Finais	80

5.3	Trabalhos Futuros	81
	Referências	82
	Apêndice A – Produção Bibliográfica	86
A.1	Artigos em Congressos Internacionais	86
A.1.1	Artigo Publicado IEEE/ISIE.	86
A.1.2	Artigo Submetido ao IEEE/INDUSCON.	87
	Apêndice B – Anexo	88

1 INTRODUÇÃO

1.1 ILUMINAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO

Os Diodos Emissores de Luz (do inglês, *Light Emitting Diode*) (LEDs) são dispositivos semicondutores de estado sólido que convertem energia elétrica em luz, fenômeno chamado de eletroluminescência. Os LEDs permitem passagem de corrente elétrica em apenas um sentido, e essa condução direta resulta na produção de fótons (luz) e calor.

O primeiro diodo emissor de luz produzia unicamente o espectro visível vermelho e foi inventado em 1962, por Nick Holonyak da General Electric (IESNA, 2005). Durante os anos posteriores, 1970 à 1990 (COSTA, 2009), houve um grande desenvolvimento dos LEDs. A disponibilidade de LEDs em cores vermelha, azul e verde resultou na criação de novas cores através da combinação dessas três. Além disso, com o desenvolvimento do LED azul, foi possível a geração da luz branca (NICHIA, 1996).

Com base nessa sucinta apresentação de desenvolvimento dos LEDs, será abordado em seguida o princípio de funcionamento, as principais características, a modelagem elétrica e suas aplicações. E, posteriormente será apresentado um resumo da utilização da iluminação suplementar no crescimento de vegetais.

1.1.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS LEDS

Os diodos emissores de luz são dispositivos semicondutores formados pela junção de duas camadas semicondutoras P-N. Na camada P há uma predominância de lacunas, caracterizadas pela ausência de elétrons em determinadas ligações covalentes do átomo, e na região N existe excesso de elétrons, ou carência de lacunas. Quando a junção P-N é polarizada diretamente, os elétrons e as lacunas das regiões opostas se movimentam em direção à junção ou região de depleção. Neste processo ocorre a recombinação entre esses portadores o que resulta na emissão de fótons. A Figura 1 ilustra a polarização direta de um diodo emissor de luz (SCHUBERT, 2006).

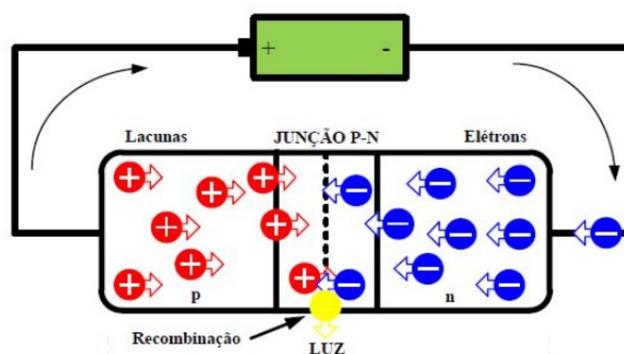


Figura 1: Polarização direta (BENDER, 2012).

A energia perdida no processo de movimentação de elétrons e lacunas é convertida em fótons, conforme estabelece a equação (1.1).

$$E = \frac{h}{\lambda} \quad (1.1)$$

Onde o comprimento de onda λ depende da diferença entre níveis de energia e os compostos químicos empregados. E é a energia de banda proibida, e h é a constante de Planck ($6,62 \cdot 10^{-34} J.s$). É possível relacionar os comprimentos de onda e a energia dos fótons com os espectros correspondentes, como é mostrado na Tabela 1 (YAM & HASSAN, 2005).

Tabela 1: Cor da luz emitida , Comprimento de onda , Energia de Fóton.

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

1.1.2 CATEGORIA DOS LEDS

Com o tempo, devido principalmente à evolução dos LEDs, surgiu a necessidade de separá-los em categorias, com destaque para os LEDs indicativos, de alto brilho e de potência. Esses dispositivos não podem ser ligados diretamente à rede elétrica, visto que, trabalham com sinais de tensão e corrente diferentes dos sinais fornecidos pela rede. Assim, é necessário fazer uso de um conversor. Primeiramente surgiram os LEDs indicativos, apresentados na Figura 2, utilizados para sinalizar, por exemplo, se determinada função de um equipamento elétrico / eletrônico está ativa ou não.

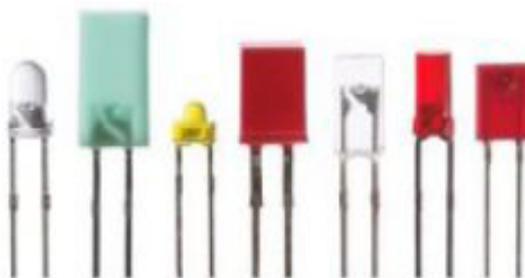


Figura 2: LEDs indicativos (CORDEIRO, 2014).

Já os LEDs de Alto Brilho (do inglês, *High Brightness*) (HB), mostrados na Figura 3, apresentam um maior fluxo luminoso e eficácia do que os LEDs indicativos e, normalmente, são utilizados em sinalização semafórica, dentre outras aplicações. A terceira categoria de LEDs compreende os dispositivos de potência, mostrados na Figura 4, que trabalham com correntes superiores às categorias citadas anteriormente, suportam potências iguais ou superiores a 1W e também apresentam um grande fluxo e eficácia luminosa.



Figura 3: LEDs de alto brilho (CORDEIRO, 2014).

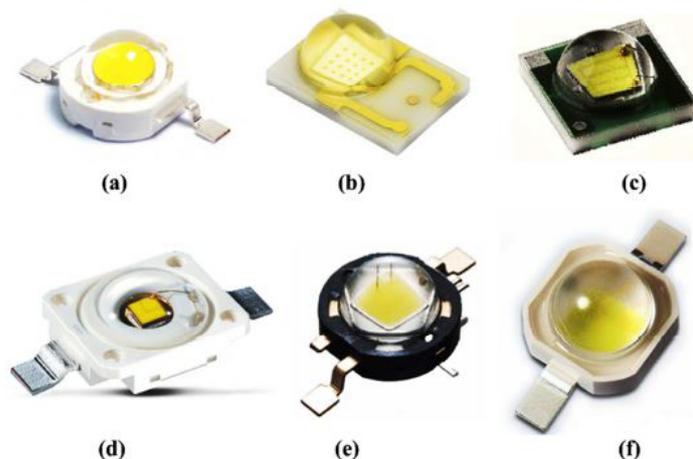


Figura 4: LEDs de potência com diferentes encapsulamentos. (a) Bridgelux (b) Philips Lumileds (c) Cree (d) Osram (e) Seoul (g) Samsung (BENDER, 2012).

1.2 CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DOS LEDS

Hoje, no mercado de iluminação, no que se refere às fontes de luz, os LEDs são considerados importantes alternativas, podendo alcançar qualidade de luz e eficiência energética de 80 a 90% (LI et al., 2012). Quando comparados com outras tecnologias de lâmpadas, é possível reduzir as emissões de gases de CO_2 , o que inclui os LEDs na categoria de produtos "verdes" (FERREIRA & TOMIOKA, 2013).

1.2.1 VIDA ÚTIL DOS LEDS

Um dos grandes interesses da tecnologia LED é a sua longa vida útil, que pode ser relacionada à temperatura baixa de junção e à corrente direta aplicada no LED.

Temperaturas de junção elevadas implicam em altas taxas de degradação do LED, o que pode ser observado pelos resultados experimentais obtidos na Figura 5.

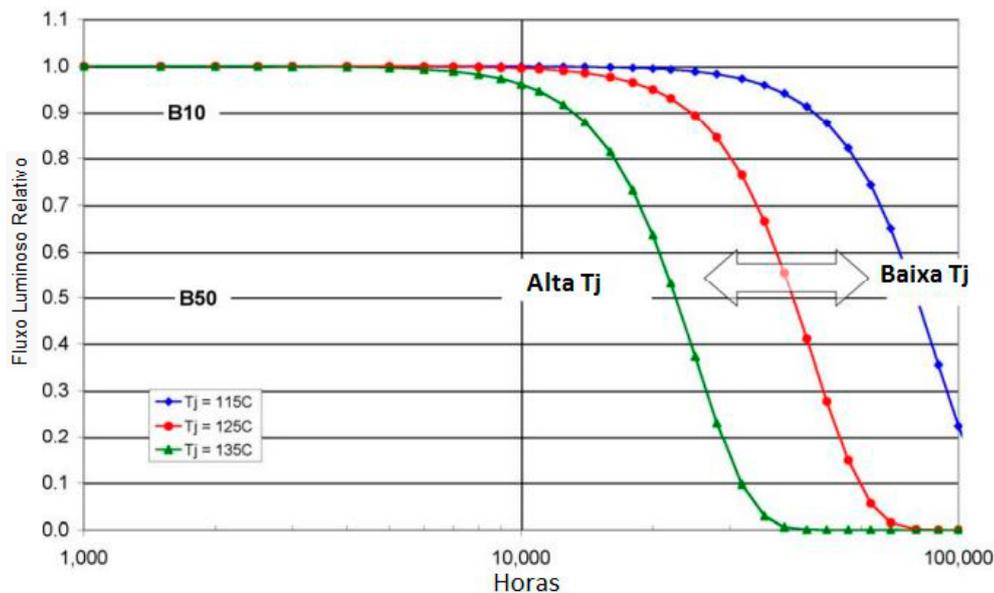


Figura 5: Efeito da temperatura de junção em um LED Luxeon K2 operando com uma corrente de 1,5 A (LUMILEDS, 2010).

Mantendo a corrente aplicada no LED em um valor constante abaixo da corrente nominal máxima especificada pelo fabricante, é possível estender a vida útil do dispositivo, conforme pode ser observado na Figura 6.

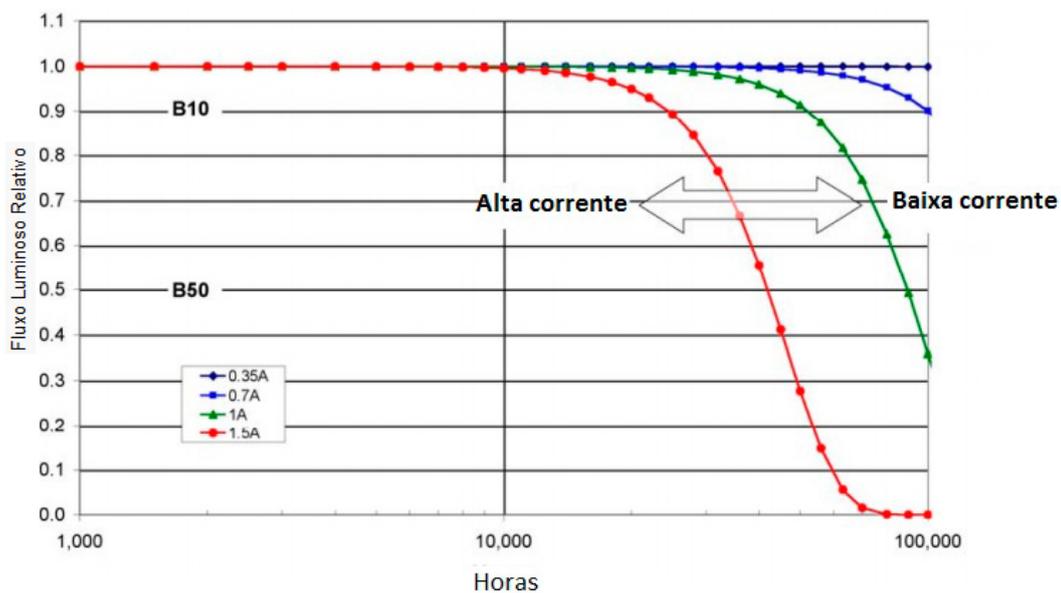


Figura 6: Efeito dos níveis de corrente na vida útil de um LED Luxeon K2 (LUMILEDS, 2010).

1.2.2 LUZ DIRECIONADA DOS LEDS

Uma das características importantes para determinadas aplicações e seus projetos é o feixe de luz direcionado do LED. A intensidade luminosa do LED é máxima no centro e decresce acentuadamente nas bordas (PINTO, 2008). O ângulo de abertura da lente de um LED pode variar bastante. Por exemplo, um LED de alto brilho possui aproximadamente de 20° a 30° , enquanto que um LED de potência tem-se um ângulo de abertura em torno de 150° .

1.2.3 MODELO ELÉTRICO LINEAR DOS LEDS

Uma efetivação conceitual do modelo elétrico do LED é feita com base na equação (1.2), admitindo-se um diodo ideal, uma fonte de tensão V_t que desempenha a tensão de limiar do LED e uma resistência dinâmica r_d em série, que fornece a inclinação da curva do LED polarizado diretamente.

$$V_{LED} = V_t + r_d \cdot I_{LED} \quad (1.2)$$

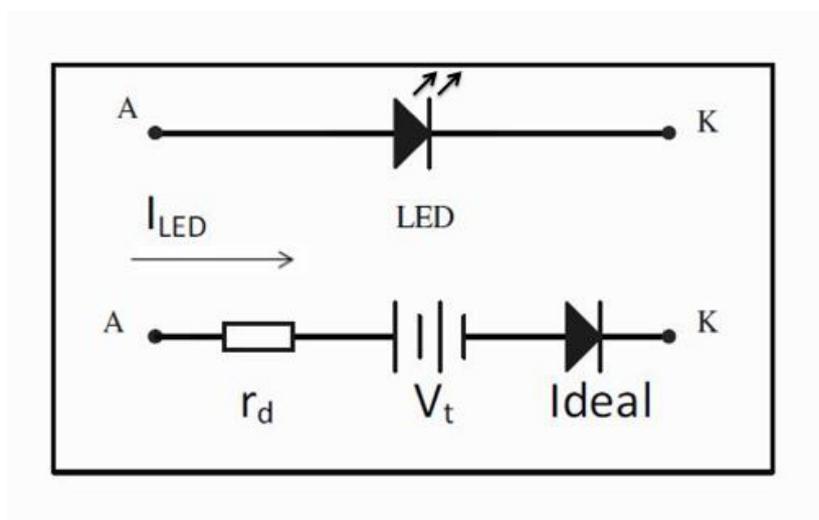


Figura 7: Modelo elétrico linear equivalente dos LEDs.

Na Figura 7, pode ser visto o modelo elétrico linear equivalente dos LEDs. Com a finalidade de implementar projetos de conversores, o modelo descrito acima, dito linear, pode ser utilizado sem maiores problemas, desde que os parâmetros V_t e r_d sejam obtidos experimentalmente.

Com base no critério de projeto, foi possível obter os parâmetros $r_d = 50,1 \Omega$ e $V_t = 75,48 \text{ V}$ utilizando a luminária comercial do fabricante Hexa. Esses valores foram utilizados no projeto do conversor.

1.3 ASPECTOS IMPORTANTES DOS LEDS E SUAS APLICAÇÕES

Com o avanço da ciência e das pesquisas, a tecnologia LED tem alcançado larga aplicação no mercado de tráfego, no mercado médico-hospitalar, na iluminação residencial, comercial, pública e industrial e, recentemente, tem ganhado grande atenção para aplicação em estudos de fisiologia vegetal.

O final do século XX e início do século XXI marcam os intensos estudos sobre os efeitos de luz artificial em cultivo de plantas (GRZESIAK et al., 2006). De acordo com (PINHO et al., 2008) várias características fazem do LED um dispositivo apropriado para aplicação em fisiologia vegetal, podendo citar-se a economia de energia, o tempo de vida útil longa, o tamanho pequeno, o comprimento de onda consistente com o espectro de absorção da fotossíntese das plantas, a capacidade de produzir elevados níveis de iluminação com baixo calor radiante e a ausência de substâncias tóxicas, como o mercúrio. Essas características, que sob várias perspectivas, fazem dos LEDs uma alternativa promissora de iluminação.

1.4 ILUMINAÇÃO SUPLEMENTAR EM FISIOLOGIA VEGETAL

A interação entre a luz e as plantas é algo conhecido pelos seres humanos desde os tempos antigos (HART et al., 1988). No entanto, o uso de iluminação artificial para aplicações em fisiologia vegetal, pode ser considerado recente (GRZESIAK et al., 2006).

A maneira como os vegetais interagem com a luz é ainda uma preocupação contínua dos produtores, pesquisadores, engenheiros e agrônomos. Essa interação promove a base para fotossíntese, fotomorfogênese (controle do crescimento e desenvolvimento da planta pela luz) e fototropismo (maneira como as plantas se movimentam em relação aos estímulos luminosos que recebe). Esses são os principais processos reguladores do desenvolvimento e crescimento das plantas, sendo a fotossíntese o processo mais relevante. A cadeia alimentar ou trófica da vida depende fundamentalmente da fotossíntese. Assim, não é de se admirar que o uso da iluminação artificial seja amplamente pesquisado para complementação da luz do dia, luz essa sujeita às variações na nebulosidade celeste e na sazonalidade das estações. Nessa perspectiva, a luz artificial é capaz

de fornecer o complemento ideal à luz natural, pelo fato de ser facilmente controlável e mais segura do que a irradiação solar (COSTA, 2006).

As publicações e artigos existentes (MASSA et al., 2008), (MORROW, 2008), (LIAN; MURTHY & PAEK, 2002) mostram que a luz artificial é usada para estimular a fotossíntese nas plantas através da emissão de um espectro eletromagnético apropriado.

Com base nos trabalhos e testes conduzidos por pesquisadores, a luz artificial é usada para compensar ou para substituir a baixa disponibilidade de luz natural e é hoje uma prática comum em países do hemisfério Norte para a produção de plantas em estufas durante o inverno (DORAIS & GOSSELIN, 2000). No Brasil, no estado do Rio Grande do sul, onde há mudanças drásticas de temperatura e tempos nublados, com maior frequência, é possível obter mudas de melhor qualidade (COSTA, 2007).

1.5 MOTIVAÇÕES E OBJETIVOS

Este trabalho surgiu do interesse em pesquisar a utilização dos LEDs na iluminação para o desenvolvimento de plantas. A motivação principal desta pesquisa é fornecer uma alternativa eficiente para experimentos envolvendo luz artificial na área de fisiologia vegetal. Com esse propósito, algumas luminárias de LEDs comerciais foram submetidas a vários testes no Núcleo de Iluminação Moderna da Universidade Federal de Juiz de Fora (NIMO-UFJF).

O objetivo central do projeto foi desenvolver um sistema eletrônico com flexibilidade, controle preciso e relevância radiométrica, garantindo um driver de LEDs de maneira a minimizar as mudanças de cor da luminária, o que é, por vezes, chamado desvio de cromaticidade.

A unidade de controle desse sistema deverá permitir a observação de tais requisitos e adequar o nível da quantidade de Radiação Fotossinteticamente Ativa (do inglês, *Photosynthetically Active Radiation*) (PAR) entregue à culturas específicas, e considerando uma distância conhecida entre as folhas da planta e a luminária.

Este trabalho também teve como meta a avaliação do módulo de LEDs e a concepção, simulação e implementação experimental do controlador, visando simplicidade, eficiência e baixo custo.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 2 foi realizada a revisão bibliográfica, os conceitos fundamentais sobre fisiologia vegetal e fotossíntese, os sistemas de medição de luz e seu equacionamento.

No Capítulo 3 foi apresentada uma abordagem experimental avaliando os módulos de LEDs, a fim de verificar a qualidade da luminária para sua futura inserção no ambiente da fisiologia vegetal.

No Capítulo 4 foram apresentados o projeto, a simulação e os resultados obtidos do conversor aplicado no acionamento dos LEDs.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões gerais deste trabalho e algumas propostas para a continuidade das pesquisas relacionadas ao uso dos LEDs em estudos de fisiologia vegetal envolvendo luz artificial.

2 LUZ E PLANTAS

2.1 INTRODUÇÃO

Como mencionado no Capítulo 1, uma das principais preocupações que envolvem estudos botânicos para desenvolvimento de plantas, é determinar a quantidade de luz artificial adequada para ser usada como suplemento da luz do dia em diferentes tipos de culturas.

Na última década, foi publicado um grande número de estudos científicos sobre o efeito de fontes de luz artificial para o processo de fotossíntese durante o cultivo de plantas, revelando a importância e atualidade desse assunto (LI et al., 2012) (SHIMADA & TANIGUCHI, 2011) (YORIO et al., 2001) (BROWN; SCHUERGER & SAGER, 1995).

O uso de algum tipo de luz artificial pode minimizar as perdas de produtividade. Além disso, as recentes mudanças climáticas em todo o mundo têm aumentado a ocorrência de secas, inundações e tempestades, que estão se tornando sérios problemas para a agricultura convencional. Assim, os setores agrícolas que usam condições relativas à temperatura, umidade e suplementos de luz artificial controlados, inseridos em suas culturas, podem contribuir decisivamente para o fornecimento regular de alimento em cidades comumente afetadas pelas condições ambientais adversas.

No entanto, cada espécie vegetal apresenta uma intensidade de luz ideal, que maximiza o crescimento e seus mecanismos de fotossíntese. Quando não existe luz suficiente, o desenvolvimento das plantas pode ser seriamente prejudicado.

Por outro lado, se houver luz excessiva, a fotossíntese pode ser fotoinibida, assim como o crescimento das plantas pode não ser observado. Além disso, a luz em excesso também pode contribuir para o desperdício de energia elétrica. Assim, a qualidade e intensidade da luz são elementos decisivos para as plantas, porque esses parâmetros influenciam o crescimento, desenvolvimento, produção e qualidade do produto final.

A fim de avaliar os efeitos da luz sobre o crescimento das plantas, os biólogos per-

ceberam que é preferível considerar o número de fótons emitidos por uma determinada fonte de luz, em vez de sua energia (MCCREE, 1972).

Além disso, a maioria das atividades fotossintéticas são impulsionadas por fótons nos comprimentos de onda entre 400 e 700 nm, assim essa convenção resultou na definição PAR, de acordo com Comissão Internacional de Iluminação (do francês, *Commission Internationale de L'Eclairage*) (CIE) (LECLAIRAGE, 1993).

O PAR é considerado uma medida de potência, e pode ser dado em (W/s ou moles/s). A grandeza radiométrica mais importante na fisiologia vegetal é a Densidade de Fluxo de Fótons Fotossintéticos (do inglês, *Photosynthetic Photon Flux Density*) (PPFD), às vezes chamada de taxa PAR ou apenas Fluxo de Fótons Fotossintéticos (do inglês, *Photosynthetic Photon Flux*) (PPF) (PINHO et al., 2008). Essa quantidade é normalmente expressa em termos do número de moles de fótons por metro quadrado por segundo ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).

A resposta da planta na região PAR é diferente da resposta do olho humano como pode ser visto na Figura 8.

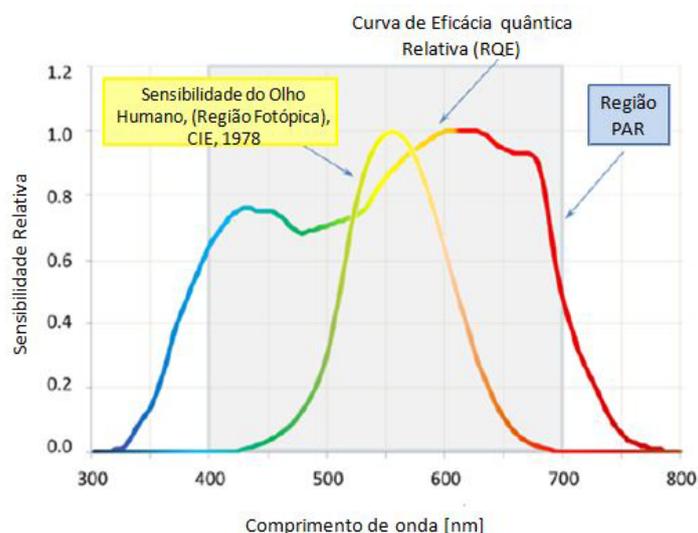


Figura 8: Comparação entre a sensibilidade da luz do olho humano (Visão Fotópica, CIE 1978) e das plantas superiores (ALMEIDA et al., 2014).

As plantas, assim como o olho humano, têm sensibilidade variável dentro do intervalo do espectro luminoso. A resposta da eficiência fotossintética de plantas superiores e algumas algas é, por vezes, denominada Eficácia Quântica Fotossintética Normalizada (do inglês, *Relative Quantum Efficiency*) (RQE). Assim, com base na análise da

figura 8, é possível observar uma maior atividade fotossintética nas faixas de comprimento de onda do vermelho (610 nm) e do azul (430 nm).

2.2 RESUMO DE ESTUDOS DE FISIOLOGIA VEGETAL

Como mencionado anteriormente, a luz artificial é concebida para estimular a fotossíntese nas plantas através da emissão de um espectro eletromagnético apropriado e, assim, gerar um aumento na produtividade e qualidade de plantas. Hoje, mais e mais produtores utilizam luz artificial em cultivo, especialmente na produção de plantas ornamentais: como rosas, crisântemos e lírios e, também, no desenvolvimento dos olerícolas: como tomate, pepino, pimentão e alface. Com o avanço dos estudos, futuramente uma gama muito maior de culturas estará envolvida. Nos testes conduzidos por pesquisadores, a luz artificial é usada para compensar ou para substituir a baixa disponibilidade de luz natural em determinadas regiões.

Diversas são as fontes de luz utilizadas para iluminação artificial. As lâmpadas incandescentes, mostrada na Figura 9, produzem luz quando a corrente elétrica passa através de um filamento. Sua eficácia luminosa típica encontra-se no intervalo de 5 a 15 lm/W e possuem, em média, um curto período de vida de 750 horas (GROWINGLIGHTS, 2012).



Figura 9: Lâmpada incandescente (GROWINGLIGHTS, 2012).

A maioria das lâmpadas incandescentes são mais utilizadas para destacar agrupamentos de plantas de interior e têm muito pouco uso em casa de vegetação. Em aplicações de crescimento de plantas a sua utilização é limitada, porém para o cresci-

mento de plantas ornamentais, como orquídeas e árvores bomsai, é uma fonte de luz ainda utilizada (GROWINGLIGHTS, 2012).

As lâmpadas fluorescentes, mostradas na Figura 10, ao contrário das lâmpadas de filamento, possuem grande eficiência por emitir mais energia eletromagnética em forma de luz do que calor. Essas lâmpadas possuem um par de eletrodos em cada extremo, e um tubo de vidro que é coberto com um material à base de fósforo. Quando excitado com radiação ultravioleta gerada pela ionização dos gases, produz luz visível. Estão disponíveis em temperaturas de cor que variam de 2.700 K a 10.000 K e sua eficácia luminosa varia de 60 lm/W a 90 lm/W (GROWINGLIGHTS, 2012).



Figura 10: Exemplo de lâmpadas fluorescente (GROWINGLIGHTS, 2012).

São mais comumente utilizadas em aplicações de crescimento para plantas do que lâmpadas incandescentes. Esse tipo de lâmpada pode alcançar um tempo de vida entre 20.000 e 36.000 horas (SIMPSON, 2003). Normalmente são utilizados para crescimento de vegetais, como pode ser observado na Figura 11 (GROWINGLIGHTS, 2012). Uma das vantagens da utilização de lâmpadas fluorescentes é seu perfil fino, tornando-se muito úteis em áreas verticais, onde o espaço é limitado.



Figura 11: Lâmpadas fluorescentes no crescimento de vegetais (GROWINGLIGHTS, 2012).

As Lâmpadas de Sódio de Alta Pressão (do inglês, *High Pressure Lamps*) (HPS), mostrada na Figura 12, são um tipo de lâmpada de descarga em meio gasoso que utilizam um plasma de vapor de sódio para produzir luz. Essas lâmpadas possuem um índice de reprodução de cor baixo e uma eficácia luminosa alta podendo variar em torno de 80 a 100 lm/W (GROWINGLIGHTS, 2012).



Figura 12: Lâmpada HPS (GROWINGLIGHTS, 2012).

A lâmpada HPS é a fonte de luz preferida para produção de culturas em estufas. Devido à alta emissão radiante, longa vida útil e alta eficiência elétrica (GROWINGLIGHTS, 2012). Esses fatores têm aumentado o uso de lâmpadas de sódio de alta pressão como fonte de iluminação suplementar, como pode ser observado na Figura 13. O benefício de lâmpadas de sódio de alta pressão para a indústria hortícola é sua capacidade de melhorar o processo de frutificação e floração nas plantas.



Figura 13: Lâmpadas HPS no crescimento de vegetais (GROWINGLIGHTS, 2012).

Existem inúmeras razões que justificam o uso eficiente da energia, como por exemplo, o aumento dos preços da eletricidade e a necessidade de redução das emissões de CO_2 . Dessa forma, é de grande importância a escolha correta da fonte de iluminação artificial em diversas aplicações. As fontes de luz convencionais não podem ser espectralmente controladas, além da quantidade de radiação ser limitada. É sabido que a qualidade espectral da radiação desempenha um papel importante no crescimento saudável das plantas. Dessa forma, a Iluminação de Estado Sólido (do inglês, *Solid State Lighting*) (SSL), surgiu como ferramenta viável e promissora para ser usada em iluminação artificial. Após décadas de pesquisas em universidades e da Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço (do inglês, *National Aeronautics and Space Ad-*

ministration) (NASA), os LEDs estão sendo usados como fonte de luz para iluminação artificial em cultivos, como pode ser observado na Figura 14. Os benefícios potenciais da tecnologia LED incluem seu baixo consumo de energia, vida útil extremamente longa, e sua capacidade para refinar o espectro de emissão de luz para realização da fotossíntese.



Figura 14: Lâmpadas de LEDs no crescimento de vegetais (GROWINGLIGHTS, 2012).

Com objetivo de apresentar o uso de fontes de luz em ambientes de pesquisas é ilustrada a montagem experimental realizada pelo Grupo de Pesquisa de Plantas em Piikkiö no sul da Finlândia nas instalações de uma estufa, que pode ser observado na Figura 15. Esse projeto foi realizado entre os anos de 2005 e 2006.



Figura 15: Estufa no sul da Finlândia (PINHO T. ROSVALL & HALONEN, 2008).

Segundo o trabalho de (PINHO T. ROSVALL & HALONEN, 2008), em cada mesa de crescimento foram inseridas as fontes de luz alinhadas lado a lado e rodeado por cortinas refletoras brancas, como pode ser observado na Figura 16. As luminárias de sódio de alta pressão e as luminárias de LED foram instaladas a aproximadamente 90 e 32 cm, respectivamente, acima dos vasos de alface (*Lactuca sativa var. crispata L.*) e a média total de PPF utilizado nesse teste foi de $180 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.



Figura 16: Vista panorâmica de dois dos blocos de crescimento composto de luminárias LED (à esquerda) e luminárias de sódio de alta pressão (à direita) (PINHO T. ROSVALL & HALONEN, 2008).

O objetivo do ensaio de crescimento foi avaliar os efeitos da composição espectral

da luz fornecida por LEDs no desenvolvimento de plantas de alface. Foram utilizados LEDs com emissões de pico de comprimento de onda de 630 nm e 460 nm. As plantas-controle foram cultivadas sob iluminação de lâmpadas de sódio de alta pressão (HPS), resultando em plantas delicadas e finas. Já as plantas cultivadas sob a luz dos LEDs eram mais fortes. O maior teor de matéria seca e a cor verde escuro das folhas de alface apareceram na plantas cultivadas sob os LEDs, quando comparado com as plantas-controle, o que pode ser uma indicação de maior concentração de clorofilas. Esses resultados indicam maior eficiência da utilização da luz pela planta, resultando em maior atividade fotossintética e valor nutricional. Embora os resultados obtidos para cada tratamento com luz não possam ser diretamente comparados, devido às diferenças de temperatura e a exposição à luz, o teste de crescimento demonstrou a viabilidade da utilização de LEDs como luz suplementar em cultivo de alface (PINHO T. ROSVALL & HALONEN, 2008).

2.3 FOTOSSÍNTESE

A fotossíntese é o processo mais relevante no desenvolvimento das plantas, mostrada na figura 17. É um processo físico – químico utilizado pelas plantas e outros organismos autotróficos para converter a energia da luz, normalmente a partir do sol, em energia química, que pode ser usada para suprir as atividades dos organismos.

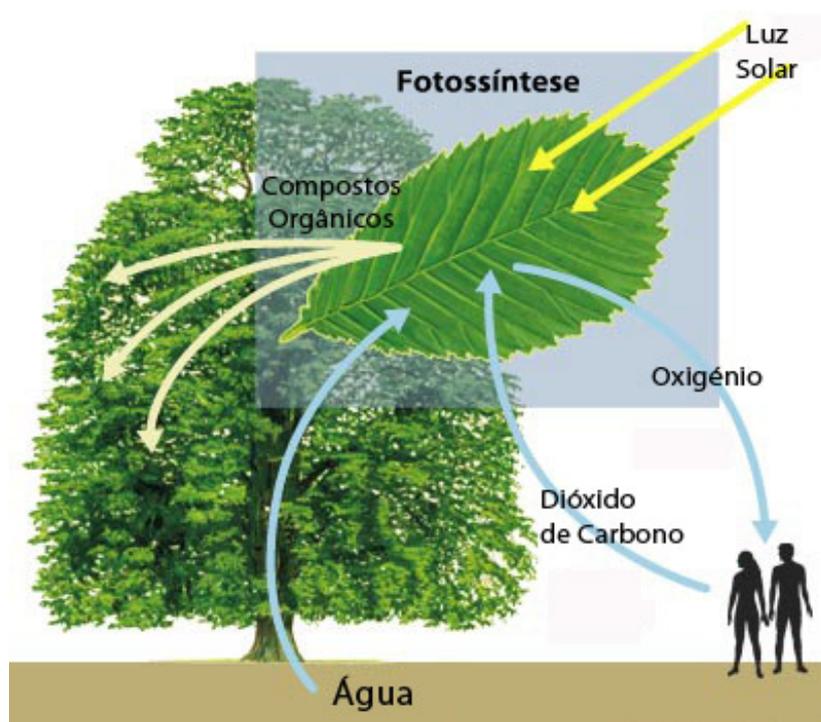


Figura 17: Fotossíntese (BIOGEO, 2012).

Durante a fotossíntese os hidratos de carbono (tais como açúcares) são sintetizados a partir de dióxido de carbono e água. O oxigênio é liberado, como um produto residual, conforme a equação (2.1). Assim, a fotossíntese mantém os níveis de oxigênio na atmosfera e fornece a maior parte da energia necessária para a vida na Terra.



Na equação (2.1), os reagentes são água e dióxido de carbono e os produtos são oxigênio, água e sacarose.

Embora a fotossíntese seja realizada de forma distinta por diferentes espécies, o processo começa sempre quando a energia da luz é absorvida por proteínas que contêm pigmentos de clorofila verde. Em plantas, essas proteínas são mantidas em organelas denominadas cloroplastos, que são mais abundantes nas células da folha. Existem outros pigmentos internos que são encontrados na maioria das plantas e também contribuem para esse processo, como por exemplo, os carotenóides.

A taxa de fotossíntese relacionada à absorção em diferentes comprimentos de onda de luz (espectro de ação) de três pigmentos, clorofila *a*, *b* e β - *caroteno* é mostrada na figura 18. Assim, é possível observar que na faixa espectro de aproximadamente 680 nm a absorção da luz é mais efetiva devido, principalmente, à clorofila *a*. Em 650 nm, a luz é mais absorvida pela clorofila *b*, e em comprimentos de onda mais curtos, a luz é absorvida pelas clorofilas *a*, *b* e β - *caroteno*.

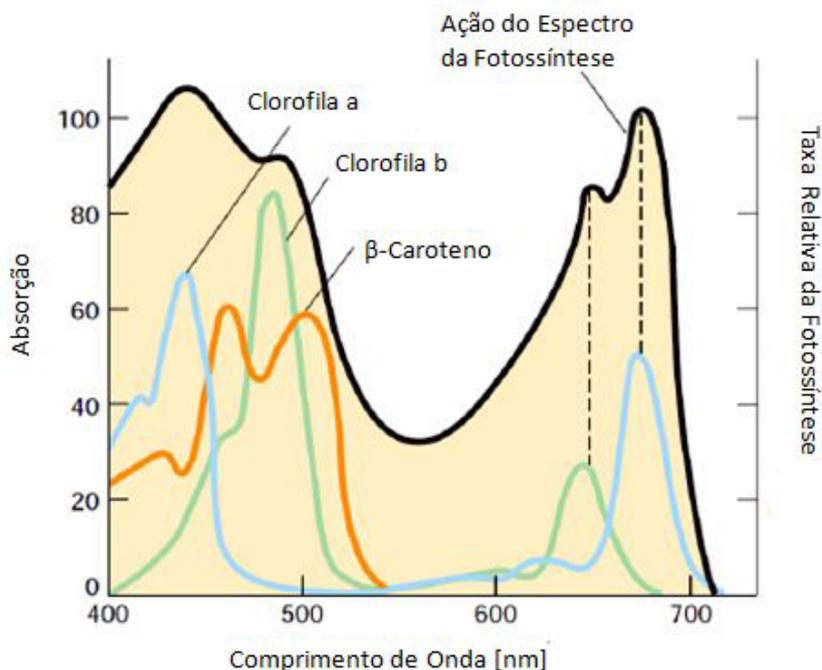


Figura 18: Taxa relativa de fotossíntese relacionada à absorção em diferentes comprimentos de onda de luz (LODISH, 2012).

Nessas reações dependentes de luz, uma parte da energia é utilizada para retirar elétrons de substâncias, tais como a água. Isso produz gás oxigênio e íons de hidrogênio, que são transferidos para um composto denominado de Dinucleótido de Nicotinamida e Adenina (do inglês, *Nicotinamide Adenine Dinucleotide Phosphate*) (NADP), reduzindo-o a Nicotinamida Adenina Dinucleótido Fosfato (do inglês, *Nicotinamide Adenine Dinucleotide Phosphate-Oxidase*) (NADPH). A energia luminosa é transformada em energia química na geração de Trifosfato de Adenosina (do inglês, *Adenosine Triphosphate*) (ATP). Os produtos dessas reações (ATP e NADPH) são usados para a síntese de açúcares nas reações de fixação e redução de CO_2 (TAIZ & ZEIGER, 2006).

2.4 SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE LUZ

De acordo com (COSTA, 2006) até 2002, haviam sido propostos pela sociedade científica três sistemas de medição de radiação: o sistema radiométrico, o fotométrico e o quântico. Dos sistemas mencionados, o sistema quântico é o mais adequado para efeitos de luz sobre as plantas. Porém, trabalhos referentes a projetos de luz para desenvolvimento de plantas, em geral, usam todos os três sistemas de maneira indiscriminada,

dependendo do conhecimento do pesquisador.

No sistema radiométrico a curva de resposta de sensibilidade dos vegetais é uma reta, e possui uma faixa de relevância dentro de 300 a 800 nm do comprimento de onda. Como representado na figura 8, o sistema fotométrico possui uma curva em formato de sino, e encontra-se limitada entre 380 a 780 nm.

O sistema quântico é limitado entre 400 a 700 nm, e existem três possibilidades de resposta, que podem ser observadas na figura 19:

- (1) Uma resposta plana.
- (2) Outra quântica, segundo a energia de fótons.
- (3) E a terceira, irregular, conforme o efeito dos fótons determinado pela curva RQE.

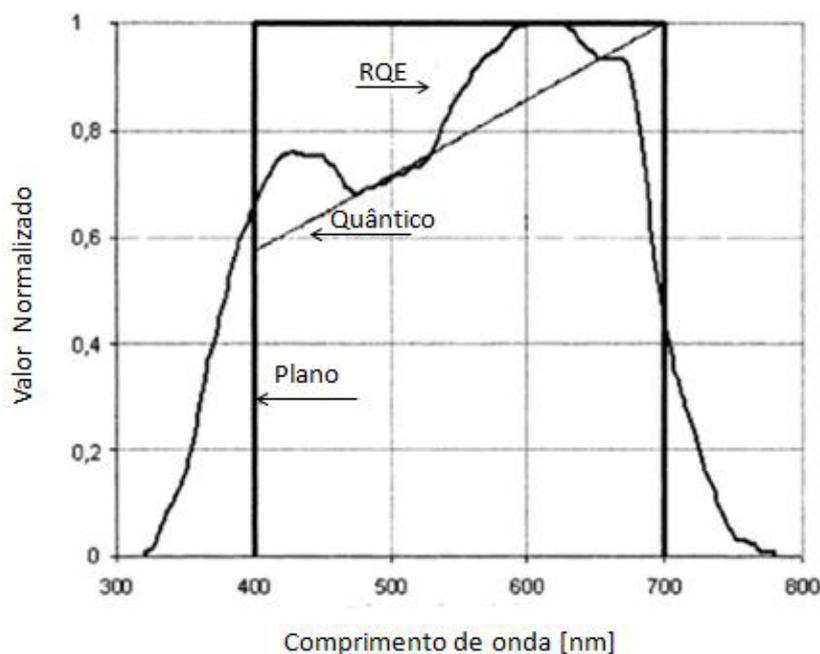


Figura 19: Curvas de resposta quântica ideais e a curva RQE (COSTA, 2006).

Segundo (PINHO et al., 2008), a padronização de medidas é bastante complicada devido à falta de um sistema de medição de radiação amplamente aceito. A situação real em medidas de radiação utilizada pelas plantas na fotossíntese é confusa. Diferentes métricas são frequentemente e indiscriminadamente utilizadas para quantificar radiação para o crescimento das plantas. Com base nas análises de (PINHO et al., 2008), neste trabalho será apresentado um sistema específico para projetos de iluminação visando

o cultivo de plantas. O sistema proposto em (COSTA & CUELLO, 2004) e (COSTA & CUELLO, 2005) é o fitométrico.

2.4.1 SISTEMA RADIOMÉTRICO

O sistema radiométrico é base para outros sistemas de medição energética. A radiometria pode ser considerada uma ciência que se dedica ao estudo das transferências de energia. Em ambientes do mundo real, as distintas formas de energia são emitidas, absorvidas, refletidas e transportadas por inúmeras superfícies do ambiente. A quantização da luz é de extrema importância, pois permite que as distintas interações da luz com a superfície sejam devidamente modeladas (MOGO, 2013).

A equação (2.2) descreve a grandeza irradiância E_e , que pode ser entendida como a quantidade de energia recebida por uma superfície (COSTA, 2006).

$$E_e = \int_{300}^{800} E_{e,\lambda} \cdot d\lambda \quad (2.2)$$

Onde: $E_{(e,\lambda)}$ é medido em $(W.m^{-2}.nm^{-1})$ e E_e em $(W.m^{-2})$

2.4.2 SISTEMA FOTOMÉTRICO

A fotometria se interessa com a quantização do espectro de ondas luminosas em comprimentos visíveis ao olho humano (MOGO, 2013).

Para o sistema fotométrico fotópico (COSTA, 2006), é possível escrever a iluminância (fluxo luminoso por unidade de área que cai sobre uma superfície; a unidade é lúmen por metro quadrado ou lux) (COATON & MARSDEN, 2001) E_v com base na equação (2.3):

$$E_v = \int_{380}^{780} E_{v,\lambda} \cdot d\lambda \quad (2.3)$$

Onde: $E_{(v,\lambda)}$ é a grandeza de iluminância espectral medido em $(lux.nm^{-1})$ e E_v em lux.

2.4.3 SISTEMA QUÂNTICO

No sistema quântico as unidades são baseadas em mols (COSTA, 2006). Nesse caso particular, a unidade de densidade de fluxo de fótons é $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$. Neste sistema é necessário converter a unidade Watt para mol, o que pode ser obtido pela equação (2.4):

$$R_q(\lambda) = \frac{\lambda}{N.h.c} = \frac{\lambda}{0.1196} \quad (2.4)$$

Onde: h é a constante de Planck ($6.626.10^{-34} J.s$), c é a velocidade da luz ($2.998.10^8 m.s^{-1}$), N o número de Avogrado ($6.023.10^{23} fotons$) e λ o comprimento de onda (nm). Aplicando a equação (2.5) na equação (2.6) é possível obter a PPF, conforme (2.8).

$$E_q = \int_{400}^{700} R_q(\lambda).E_{e,\lambda}.d\lambda \quad (2.5)$$

$$E_q = \int_{400}^{700} \frac{\lambda}{119,6}.E_{e,\lambda}.d\lambda \quad (2.6)$$

$$E_q = \int_{400}^{700} E_{q,\lambda}.d\lambda \quad (2.7)$$

Quando a equação (2.8) é ponderada pela curva da RQE, a Densidade de Fluxo de Fótons Incidentes (E_q), se transforma em Fluxo de Fótons Incidentes de Ação Fotossintética (YPF) (COSTA, 2006).

$$E_q = \int_{400}^{700} E_{q,\lambda}.P(\lambda).d\lambda \quad (2.8)$$

Onde: $P(\lambda)$ é a curva RQE.

Embasado no sistema quântico apresentado, é possível perceber que as diferentes bases para uma mesma medida ($\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$) podem gerar confusões. Por esta necessidade de padronização foi criado o sistema fitométrico.

2.4.4 SISTEMA FITOMÉTRICO

O sistema fitométrico considera a sensibilidade da planta à luz, isto é, a RQE, aplicável aos vegetais superiores (representados por dois grupos, as gimnospermas, que são plantas formadoras de flores e sementes nuas, e as angiospermas, que produzem sementes recobertas por frutos).

A energia radiante espectral $Q_{(e,\lambda)}$ é medida através de um espectrorradiômetro. O fluxo radiante fitométrico (ϕ_p) é o resultado da multiplicação da energia ou potência espectral da fonte pela curva normalizada $P(\lambda)$, e a sua unidade é o fitowatt (fitoW) (COSTA, 2006).

$$\phi_p = \int_{320}^{780} \phi_{e,\lambda} \cdot P(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.9)$$

A irradiância fitométrica (2.10) (E_p) correspondente ao fluxo radiante incidente na superfície por unidade de área.

$$E_p = \int_{320}^{780} E_{e,\lambda} \cdot P(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.10)$$

Sua unidade é fitowatt por metro quadrado (fitoW.m²). Um fitowatt por metro quadrado corresponde a irradiância fitométrica igual a 1 fitowatt incidente em uma superfície que mede 1 metro quadrado.

O sistema fitométrico desempenha um novo conceito de sistema de unidades a ser empregado na produção de vegetais. Sua medida é fundamentada na unidade “watt ponderado”, de acordo com a fotossíntese dos vegetais superiores, assim como o sistema fotométrico é para o homem. O fato da unidade do sistema ser Watt possibilita a produção de catálogos específicos para lâmpadas, o que facilitaria e padronizaria os projetos de sistema de iluminação voltados à produção de plantas.

2.5 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

A criação do sistema fitométrico surgiu da necessidade de padronização e simplificação nos projetos que tratam da fotossintetização das plantas como um todo. O sistema quântico, mesmo apresentando diferentes bases para uma mesma medida garante aos

produtores, agrônomos, pesquisadores e engenheiros um sistema de medição de iluminação eficiente. Baseado nos sistemas de medição de luz apresentados neste capítulo, este trabalho se baseará no sistema de medição quântica, devido à falta de um sistema de medição de radiação amplamente aceito, obtendo a unidade de medida PPF por meio do utilitário SpectraSuite (PAR) da Ocean Optics. Todos os módulos de LEDs avaliados neste trabalho utilizam uma configuração de medição óptica característica para plantas, com auxílio do utilitário citado, que será detalhado no próximo capítulo.

3 AVALIAÇÃO DE MÓDULOS DE ESTADO SÓLIDO PARA UM CRESCIMENTO IDEAL DE PLANTAS

3.1 SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA AVALIAÇÃO DOS MÓDULOS DE ESTADO SÓLIDO

Conforme abordado no Capítulo 2, as medições de radiação PAR são de grande importância para estudos em fisiologia vegetal e cultivos comerciais assistidos por luz artificial. Neste sentido, torna-se necessária uma avaliação desta medição em relação a determinados arranjos de LEDs encontrados comercialmente a fim de selecionar a luminária mais indicada para a proposta final deste trabalho. Portanto, para estas medições, foi construído um ambiente de características apropriadas tanto para experimentação do crescimento das plantas através dos módulos de LED quanto para avaliação desses mesmos módulos, capaz de evitar de forma eficiente a reflexão provinda da luz, fazendo com que a luminosidade sentida pelo sensor utilizado seja emitida exclusivamente pela luz dos arranjos dos LEDs. A representação esquemática deste sistema, denominado neste trabalho por "caixa preta", bem como suas dimensões podem ser visualizados através da Figura 20. Este ambiente de medição tanto de uma tampa de vedação e corpo preto fosco e conforme mostrado, a luminária de LEDs a ser avaliada é fixada na parte superior enquanto que o sensor, difusor cossenoidal, é inserido no centro da parte inferior da caixa.

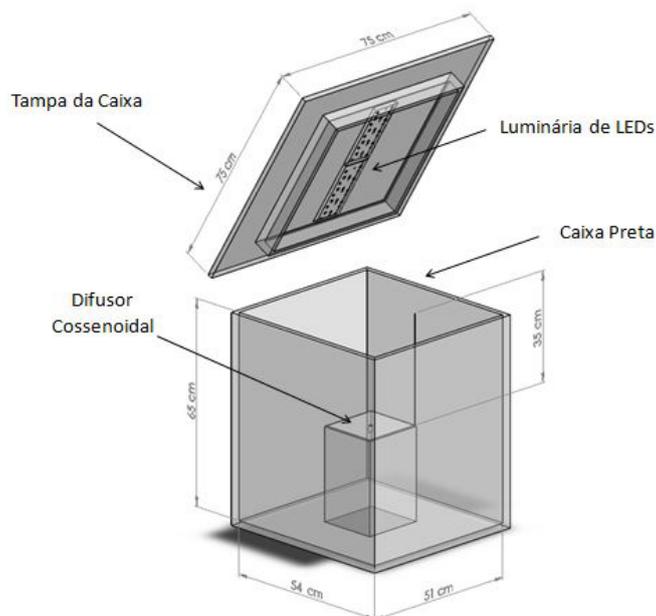


Figura 20: Representação esquemática da "caixa preta" (ALMEIDA et al., 2014).

Para a seleção adequada da luminária a ser utilizada nos experimentos do presente trabalho, alguns parâmetros necessitam ser avaliados. Dessa forma, o sistema de medição completo deve incluir outros equipamentos, tais como spectrorradiômetro Labsphere CDS610 (Labsphere, 2014), que possui um range de calibração de (350 a 1000 nm), em associação com o SpectraSuite da Ocean Optics. Além disso, uma fibra óptica se faz necessário, para o envio de dados provenientes do sensor difusor cossenoidal CC-3-UV-S (200-2500 nm) para a Labsphere. Os dados a serem avaliados de cada luminária são posteriormente analisados tanto quantitativamente quanto qualitativamente através do computador, sendo então tratados e processados. O esquemático do sistema completo de medição é apresentado na Figura 21.

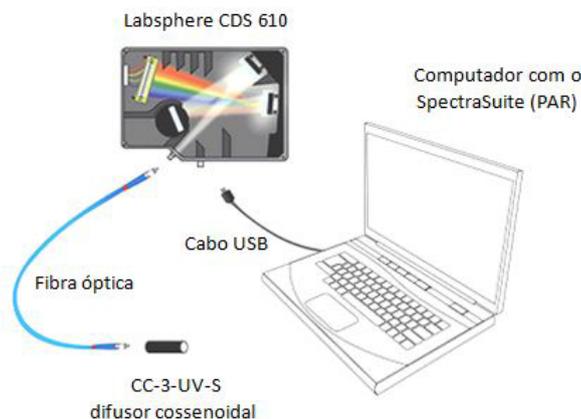


Figura 21: Equipamentos necessários para medições PAR (ALMEIDA et al., 2014).

Além da avaliação do desempenho fotossintético, é necessário extrair outros parâmetros relevantes para a construção do conversor da luminária. Nas subseções seguintes são apresentados os resultados referentes aos testes com módulos de LEDs comerciais, a fim de, exibir as características relevantes de cada módulo. É importante informar que, em todos os testes realizados, as luminárias foram anexadas uma por vez na tampa da caixa, sendo a ponta do difusor cossenoidal inserida no seu centro geométrico, 35 centímetros abaixo da tampa.

3.1.1 TESTE (1) - LUMINÁRIA LEDS NICHIA NF2L757ART SW30/P16-V1 - P18/R8000

O primeiro arranjo de LEDs a ser analisado foi obtido junto ao fabricante brasileiro Everlight. Tal arranjo é composto por setenta e dois LEDs brancos quentes do tipo Nichia NF2L757ART SW30/P16-V1-P18/R8000 com associação mista, temperatura de junção de 120° e potência de dissipação de $1,4W$ (NICHIA, 2013). A luminária pode ser vista na Figura 22, a corrente total fornecida ao arranjo é de $2,7 A$ e o presente módulo controla a corrente a partir de uma tensão fixa aplicada através dos CIs 317LB-PSXG. Os principais parâmetros fotométricos, obtidos pela esfera integradora "LMS-400 40", bem como elétricos são apresentados na Tabela 2.

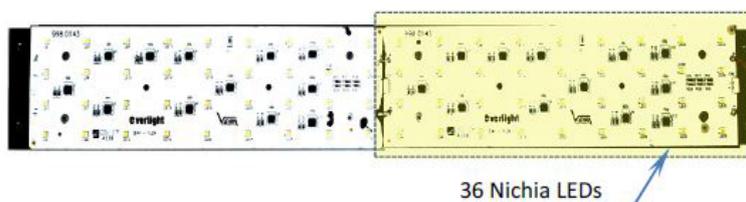


Figura 22: Luminária Nichia LEDs.

Tabela 2: Principais parâmetros da luminária Nichia.

Parâmetro	Valor
Fluxo luminoso Fotópico	3500 lm
Temperatura de Cor correlata	3906 K
Índice de reprodução cores	83%
Resistência Equivalente	$r_d=1,48 \Omega$
Tensão de limiar do LED	$V_t= 21,2 \text{ V}$
Corrente de alimentação do LED	2,7A

O desempenho fotossintético do LED foi avaliado por meio da configuração de medição PAR descrito e ilustrado nas Figuras 20 e 21. O gráfico de potência espectral radiométrica dos LEDs pode ser observado na Figura 23.

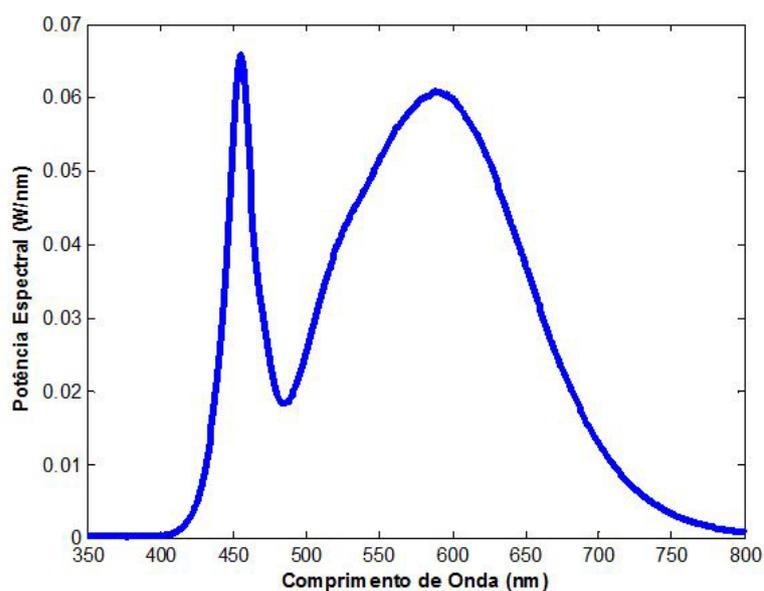


Figura 23: Potência espectral radiométrica, obtido experimentalmente.

A análise de PPF desse primeiro teste é apresentada na Tabela 3. Foi possível

observar diferentes faixas de comprimento de onda, PPF da luz coletada bem como a medição total de PPF. Cinco faixas de comprimento de onda distintos foram medidos com auxílio do SpectraSuite. No entanto, as faixas 1 e 5 respectivamente entre (300 nm a 400 nm) e (700 nm a 800 nm), apresentaram valores não significativos e foram excluídas.

Tabela 3: Radiação fotossinteticamente ativa.

Total PPF		$1,0759.10^2 \mu mol.m^{-2}.s^{-1}$
Faixa2		$2,60.10^1 \mu mol.m^{-2}.s^{-1}$
	De:	400nm
	Até:	500nm
	Luz:	24,27%
Faixa3		$5,588.10^1 \mu mol.m^{-2}.s^{-1}$
	De:	500nm
	Até:	600nm
	Luz:	42,72%
Faixa4		$4,5965.10^1 \mu mol.m^{-2}.s^{-1}$
	De:	600nm
	Até:	700nm
	Luz:	33,35%

Como observado, a luminária testada forneceu um PPF total de cerca de $108 \mu mol.m^{-2}.s^{-1}$.

3.1.2 TESTE (2) - LUMINÁRIA DE LEDS EVERLIGHT EHP-AX08EL

A luminária deste ensaio, Figura 24, possui nove LEDs Everlight EHP-AX08EL 3W e seus LEDs estão associados em série. Segundo (DIAS, 2012), os diodos emissores de luz que estão inseridos na luminária foram distribuídos linearmente sobre uma barra de alumínio que tem a função de suporte e também de dissipar o calor gerado na junção dos LEDs. A máxima potência de operação da luminária é 3W e o ângulo de abertura dos LEDs encontra-se em torno de 140° .



Figura 24: Luminária de LEDs Everlight EHP-AX08EL.

Seus principais parâmetros, obtidos experimentalmente, são apresentados na Tabela 4 (DIAS, 2012). Com base nas análises, os parâmetros PAR foram obtidos e se encontram indicados na Tabela 5.

Tabela 4: Parâmetros do LED Everlight EHP-AX08EL.

Parâmetro	Valor
Fluxo luminoso	75lm@300mA
Temperatura de Cor correlata	3250K
Índice de reprodução cores	75%
Resistência Equivalente	$r_d=1,8 \Omega$
Tensão de limiar do LED	$V_t= 2,7 V$
Máxima corrente de operação	700mA

Tabela 5: Radiação fotossinteticamente ativa.

Total PPF		$16,53 \mu mol.m^{-2}.s^{-1}$
Faixa2		$2,02 \mu mol.m^{-2}.s^{-1}$
	De:	400nm
	Até:	500nm
	Luz:	12,27%
Faixa3		$7,21 \mu mol.m^{-2}.s^{-1}$
	De:	500nm
	Até:	600nm
	Luz:	43,61%
Faixa4		$7,33 \mu mol.m^{-2}.s^{-1}$
	De:	600nm
	Até:	700nm
	Luz:	44,39%

É possível perceber diferentes faixas de comprimento de onda e o PPF correspondente. Também neste ensaio foram avaliadas cinco faixas distintas de comprimento de onda. No entanto, as faixas 1 e 5 apresentam valores insignificantes, pois encontram-se entre 300 a 400 nm e 700 a 800 nm, respectivamente. A potência espectral radiométrica obtida experimentalmente é apresentada na Figura 25.

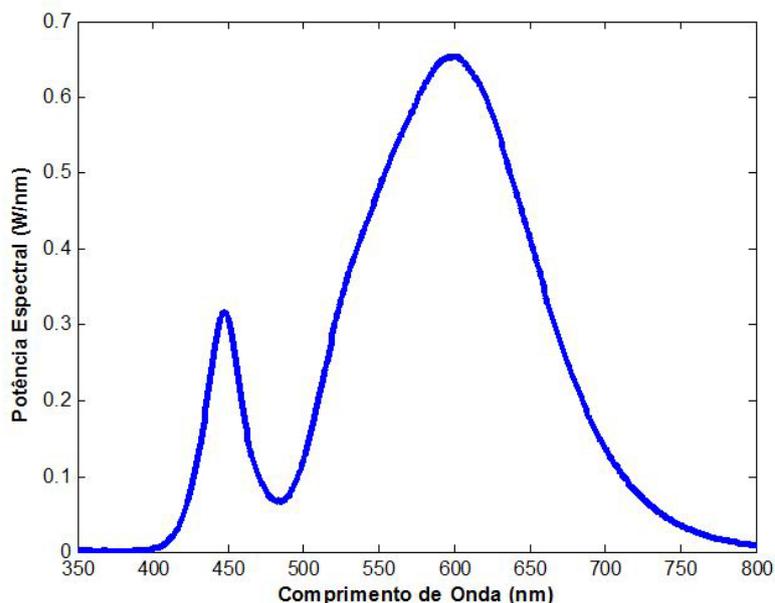


Figura 25: Potência espectral radiométrica obtida experimentalmente.

Como observado neste teste, a luminária forneceu um PPF total de cerca de $16,53 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ e o pico de radiação fotossinteticamente ativa encontra-se na faixa entre 600 nm a 700 nm.

3.1.3 TESTE (3) - LUMINÁRIA DE LEDS EVERLIGHT NF2L757ART SW30/P16-V1 - P18/R8000

A luminária utilizada para este ensaio pode ser vista na Figura 26. A mesma possui vinte e três LEDs do tipo NF2L757ART SW30/P16V1 - P18/R8000 brancos associados em série. Segundo NICHIA (NICHIA, 2013), a temperatura de junção dos LEDs é de 120° com potência de dissipação de $1,4W$ (NICHIA, 2013). Seus principais parâmetros são exibidos na Tabela 6. Com base nos testes realizados foi possível obter os parâmetros PAR. Os dados, exibidos na Tabela 7, apresentam o PPF correspondente à faixa de comprimento de onda selecionada e, logo em seguida, na Figura 27, é apresentada a potência espectral da luminária, obtida através da esfera integradora.



Figura 26: Luminária de LEDs Everlight NF2L757ART SW30/P16-V1 - P18/R8000.

Tabela 6: Parâmetros da luminária de LEDs NF2L757ART SW30/P16-V1 - P18/R8000.

Parâmetro	Valor
Fluxo luminoso	$7,56 \cdot 10^2 lm$
Temperatura de Cor correlata	3046K
Índice de reprodução cores	81%
Máxima corrente de operação	90mA

Tabela 7: Radiação fotossinteticamente ativa.

Total PPF	$2,717 \cdot 10^1 mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
Faixa2	$2,799 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
	De: 400nm
	Até: 500nm
	Luz: 10,30%
Faixa3	$1,149 \cdot 10^1 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
	De: 500nm
	Até: 600nm
	Luz: 42,28%
Faixa4	$1,2966 \cdot 10^1 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
	De: 600nm
	Até: 700nm
	Luz: 47,71%

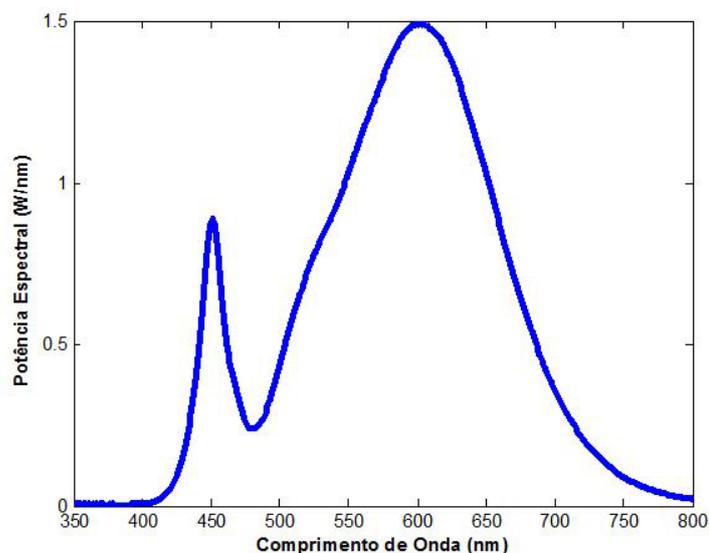


Figura 27: Potência espectral radiométrica obtida experimentalmente.

Através dos resultados mostrados, percebe-se que a luminária forneceu um valor de PPF total de aproximadamente $27,17 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ e o pico de radiação fotossinteticamente ativa encontra-se na faixa de 600 nm a 700 nm.

3.1.4 LUMINÁRIA DE LEDS COMERCIAL HEXA

Neste ensaio a luminária do fabricante HEXA será analisada e é apresentada na Figura 28. Esta é composta por vinte e oito LEDs brancos quentes arranjados em série fixadas a um dissipador de alumínio. A corrente total fornecida por este arranjo é em torno de 350 mA. Os principais parâmetros deste arranjo podem ser visualizados na Tabela 8.



Figura 28: Luminária de LEDs do fabricante HEXA.

Tabela 8: Principais parâmetros da luminária Hexa.

Parâmetro	Valor
Fluxo luminoso Fotópico	2491 lm
Temperatura de Cor correlata	5319 K
Índice de reprodução cores	67,2%
Resistência Equivalente	$r_d=50,1 \Omega$
Tensão de limiar do LED	$V_t= 75,48 \text{ V}$
Corrente de alimentação do LED	350mA

A potência espectral radiométrica da luminária HEXA, obtida experimentalmente é apresentada na Figura 39.

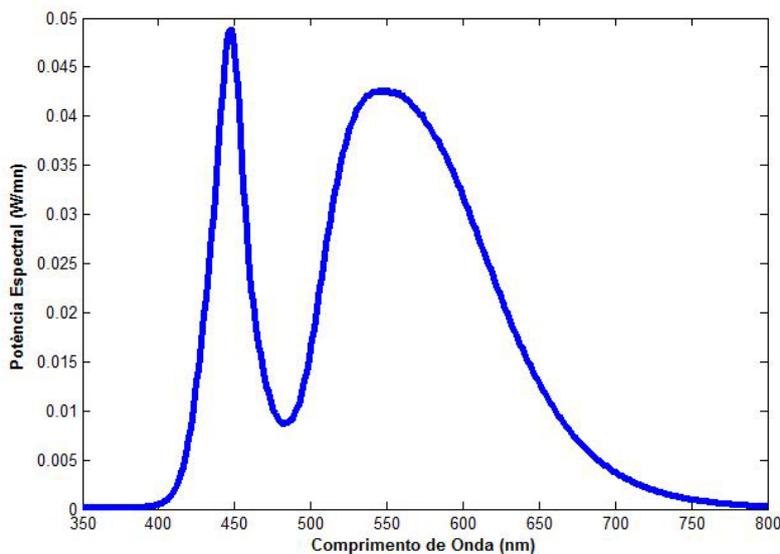


Figura 29: Potência espectral radiométrica obtida experimentalmente.

Na Tabela 9 é apresentada uma análise quantitativa das faixas de comprimento de onda da radiação fotossinteticamente ativa bem como a medição total da mesma. Foram medidos cinco faixas de comprimento de onda distintos através do SpectraSuite. Ressalta-se que as faixas 1 e 5 apresentam medidas insignificantes.

Tabela 9: Radiação fotossinteticamente ativa.

Total PPF		$1,0066.10^2 \mu mol.m^{-2}.s^{-1}$
Faixa2		$3,176.10^1 \mu mol.m^{-2}.s^{-1}$
	De:	400nm
	Até:	500nm
	Luz:	31,56%
Faixa3		$3,689.10^1 \mu mol.m^{-2}.s^{-1}$
	De:	500nm
	Até:	600nm
	Luz:	36,65%
Faixa4		$3,226.10^1 \mu mol.m^{-2}.s^{-1}$
	De:	600nm
	Até:	700nm
	Luz:	32,05%

Como pode ser observado, a luminária em análise emitiu um PPF total de aproximadamente $100 \mu mol.m^{-2}.s^{-1}$, que representa um nível típico e adequado para

iluminação suplementar em estudos de fisiologia vegetal, que segundo (PINHO; TETRI & HALONEN, 2005) variam de 30 a 600 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

Por conseguinte, após a realização de todos os testes com os diferentes módulos de LEDs comerciais, constatou-se que a Luminária do fabricante HEXA foi a mais indicada para o devido processo, pois apresenta características consistentes, tais como arranjo plano, geometria simplificada, nível de radiação quantum adequada e ampla distribuição espectral.

3.2 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Com base nos testes realizados em laboratório e o arranjo de LEDs das luminárias testadas neste capítulo, pode-se considerar que o fornecimento da luminária escolhida é impulsionado por uma corrente de alimentação apropriada e bem controlada, uma vez que a associação de LEDs na luminária em questão é simples e a conexão está em série, diferentemente da luminária do primeiro teste que também gerou um nível de PPF aceitável e foi descartada por sua associação de LEDs ser mista, o que dificultaria o controle da corrente. A luminária escolhida se destacou não somente pelos níveis de PPF, mas também por sua simplicidade de associação dos arranjos de LEDs, que encontram-se associados em série e facilitam o controle da corrente, o que não é trivial de se fazer utilizando a luminária referente ao primeiro teste, que apesar de possuir níveis adequados de PPF, a sua associação de LEDs é mista, dificultando o controle da corrente. Desta forma, realizou-se uma comparação entre as medidas de PPF obtidas de cada luminária e constatou-se que a luminária do fabricante HEXA possui características adequadas para sua utilização como fonte de luz no crescimento satisfatório de plantas.

4 SISTEMA ELETRÔNICO PROPOSTO

4.1 INTRODUÇÃO

A Figura 30 apresenta o esquema simplificado do sistema eletrônico proposto.

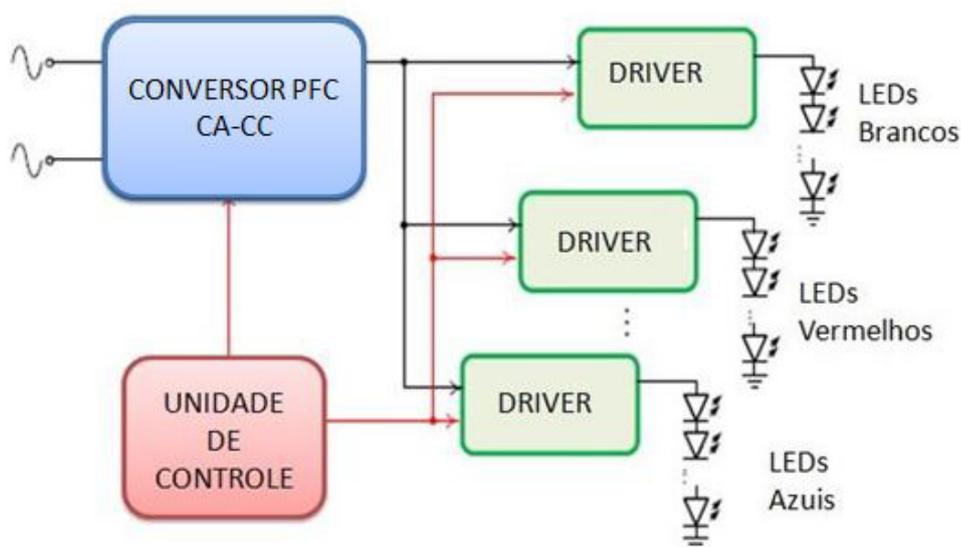


Figura 30: Sistema eletrônico proposto (ALMEIDA et al., 2014).

De acordo com a Figura 30, o sistema é composto basicamente por dois conversores estáticos, um responsável pela conversão CA-CC com correção de fator de potência (PFC, do inglês, Power Factor Correction) e um outro que é o controlador de corrente nos LEDs (driver). Como é possível observar, cada grupo de LEDs exige o seu próprio driver. Um driver de LEDs pode ser realizado por um conversor abaixador (e.g. Buck) ou elevador (e.g. Boost), dependendo das condições da tensão CC de entrada e das necessidades do arranjo de LEDs. Cada driver de LED deve ser capaz de fornecer maior flexibilidade na iluminação. A luminária pode ser combinada com vários conjuntos de

LEDs monocromáticos, ou mesmo diferentes conjuntos de LEDs brancos, com diferentes Temperatura de Cor Correlata (do inglês, *Correlated Color Temperature* (CCT), ou até mesmo fazer uso de LEDs (do inglês, *Red Green Blue*) (RGB).

Em todos os casos, os principais requisitos para o driver de LED são: (1) garantir uma corrente bem regulada; (2) permitir o controle da corrente média fornecida aos LEDs; (3) fornecer uma corrente de onda quadrada, com pico constante para efeitos de escurecimento, de forma a minimizar as mudanças de cor, o que é, por vezes, chamado de desvio de cromaticidade (ALMEIDA et al., 2011).

Assim, a unidade de controle deve ser capaz de observar esses requisitos e também informar ao usuário da luminária (por exemplo um biólogo) a quantidade de nível PAR que será entregue a uma dada cultura a certa distância conhecida entre as folhas da planta e a luminária. Este trabalho não avaliou todas as unidades do sistema representado na Figura 30, apenas será centrado na avaliação do módulo de LED e na criação do controlador, que deveria ser simples, eficiente e de menor custo possível.

4.2 METODOLOGIA

4.2.1 CONVERSOR BUCK

Neste trabalho foi projetado um driver para acionamento de um módulo de LEDs. Dentre os conversores existentes escolheu-se o Buck, devido a capacidade que o mesmo possui de oferecer uma tensão de saída menor do que a de entrada, além da simplicidade e baixo custo da topologia. No projeto do conversor Buck, a tensão de entrada, representada por V_B , é controlada pelo interruptor Q1. A comutação periódica de Q1 faz com que seja demandada da fonte uma corrente pulsada. Essa corrente é filtrada pelo indutor L, de modo que a corrente de saída possua baixa ondulação. A tensão de saída, V_o possui baixa ondulação devido à filtragem realizada pelo capacitor de saída. A topologia desse tipo de conversor pode ser visualizada na Figura 31.

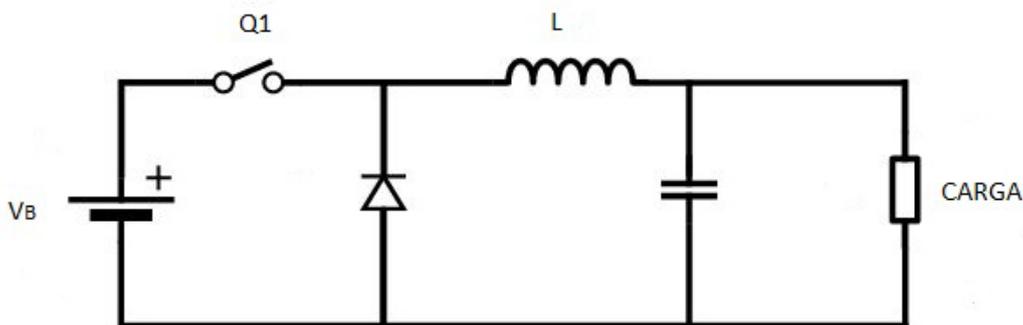


Figura 31: Conversor Buck.

Quando o interruptor Q1 está conduzindo, a energia é transferida da fonte para o indutor e para carga (nesse caso a corrente i_o cresce). Ao desligar Q1, o diodo conduz, fornecendo um caminho para a corrente pelo indutor. Desse modo, a energia que foi armazenada no indutor L passa a ser entregue à carga. O conversor aciona uma carga com vinte e oito LEDs brancos quentes do fabricante HEXA escolhidos com o objetivo de melhor inserção no ambiente da iluminação artificial com o propósito de gerar benefícios a diferentes tipos de plantas.

4.2.2 *CONTROLE POR HISTERESE*

O controle por histerese foi proposto pela primeira vez por (KOCHER & STEIGERWALD, 1982). Esta metodologia de controle é baseada em um circuito comparador, que utiliza os limites inferior e superior da corrente do indutor como sinais de referência para comparação, conforme apresentado na Figura 32.

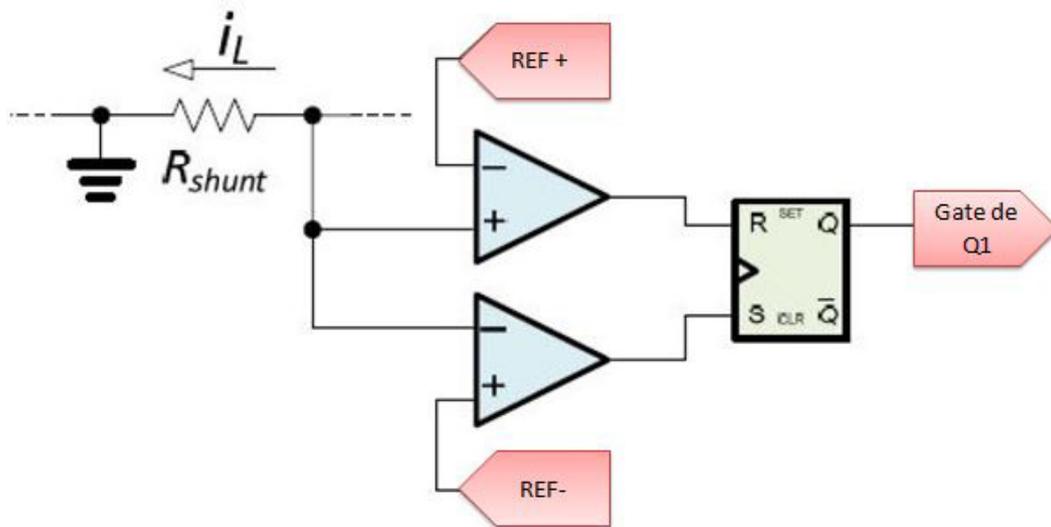


Figura 32: Controlador por histerese.

O comando é concebido de forma que a corrente sempre mantém seu valor instantâneo dentro da banda de histereses, como pode ser inferido pelas equações (4.1) e (4.2).

$$I_{REF+} = I_{REF} + \frac{\Delta i_0}{2} \quad (4.1)$$

$$I_{REF-} = I_{REF} - \frac{\Delta i_0}{2} \quad (4.2)$$

O controle é realizado da seguinte forma: o interruptor Q1 entra em condução quando a corrente do indutor encontra-se abaixo do menor valor pré-definido e é desligado quando a corrente do indutor fica acima do valor superior, o que força o conversor a operar com frequência de comutação variável (LU & MOLAVI, 2007). A Figura 32 mostra o resistor de derivação shunt (R_{shunt}), que é um elemento muito importante do circuito, devendo operar de forma linear e possuir uma resposta rápida.

4.2.3 DIMERIZAÇÃO

Além do controle por histerese implementado para a comutação do conversor Buck, um controlador de Modulação por Largura de Pulso (do inglês, *Pulse Width Modulation*) (PWM) foi utilizado para o Ajuste de Intensidade Luminosa (AIL), (*dimming*, ou dimerização) do LED. São três os métodos conhecidos para variação de intensidade luminosa: dimerização por amplitude, por largura de pulso e *Bi-nível*. De acordo com (LUN et al., 2009), a técnica de condução em modo PWM é preferencial e mais frequentemente utilizado. Assim, neste trabalho, foi projetado um circuito de dimerização por largura de pulso, devido a simplicidade de implementação e boa estabilidade cromática.

4.2.3.1 DIMERIZAÇÃO POR AMPLITUDE

No método de dimerização por Modulação por Amplitude (do inglês, *Amplitude Modulation*) (AM), a corrente média, I_f , é aumentada ou reduzida, conforme pode ser observado, na Figura 33. Segundo os estudos de (CORDEIRO, 2014) esse método prejudica a estabilidade cromática do LED.

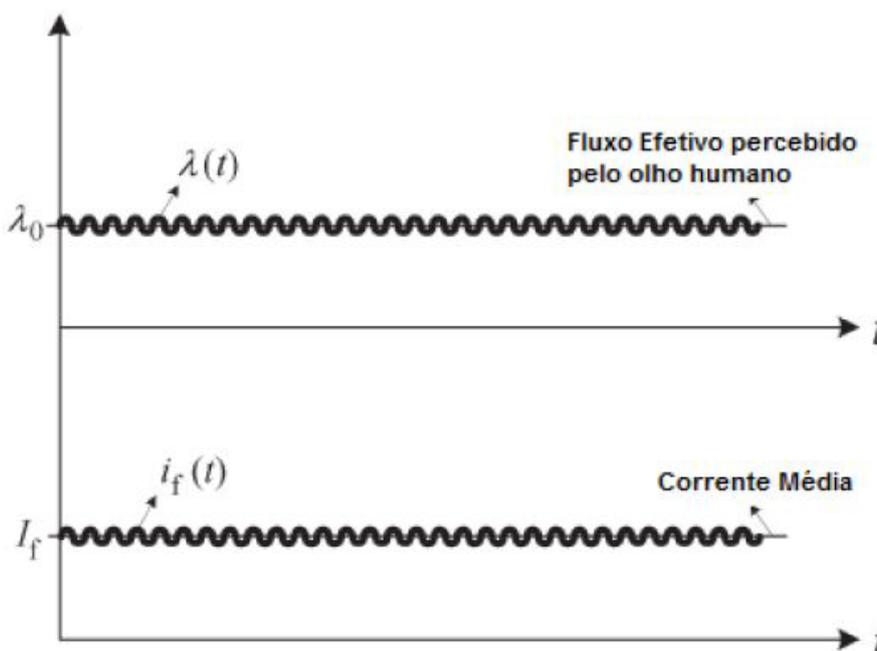


Figura 33: Dimerização por AM (CORDEIRO, 2014).

4.2.3.2 DIMERIZAÇÃO POR LARGURA DE PULSO

O método de dimerização por PWM, inclui a manutenção da corrente de pico do LED. Nesse caso, a dimerização consiste em manter o pico de corrente nos LEDs durante um intervalo determinado de tempo e zerar essa corrente no restante do período de comutação. Esse método é ilustrado na Figura 34.

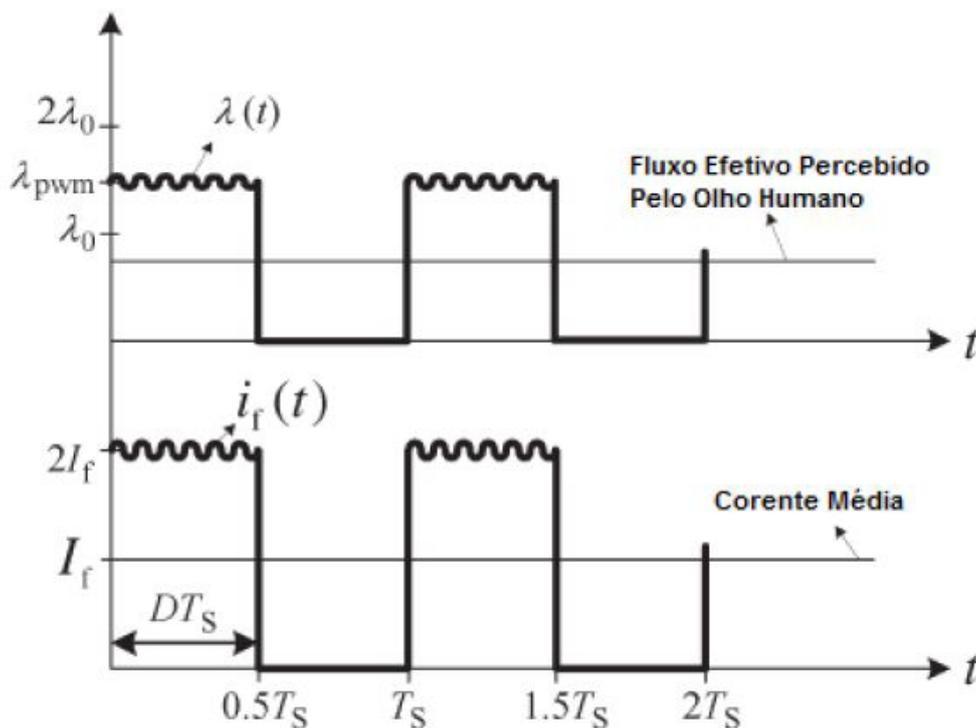


Figura 34: Dimerização por PWM (CORDEIRO, 2014).

A técnica PWM preserva a característica cromática do LED e a manutenção de um pico de corrente fixa, garantindo que a temperatura de cor do LED varie menos para diversos níveis de corrente média, quando comparado com a variação do valor da amplitude da corrente em si (sem pulsá-la), sendo considerada uma boa maneira de variar a intensidade luminosa, do ponto de vista da estabilidade cromática e implementação simplificada (ALMEIDA, 2012).

4.2.3.3 DIMERIZAÇÃO BI-NÍVEL

A dimerização do tipo *bi-nível*, consiste em uma variação da corrente entre dois níveis, o nível inferior, em amplitude, e o nível superior, em PWM, como pode ser observado na Figura 35. Sabe-se que a dimerização bi-nível evita variações de tempe-

ratura de junção pelo fato de a corrente nos LEDs não cair a zero como no método PWM exclusivo.

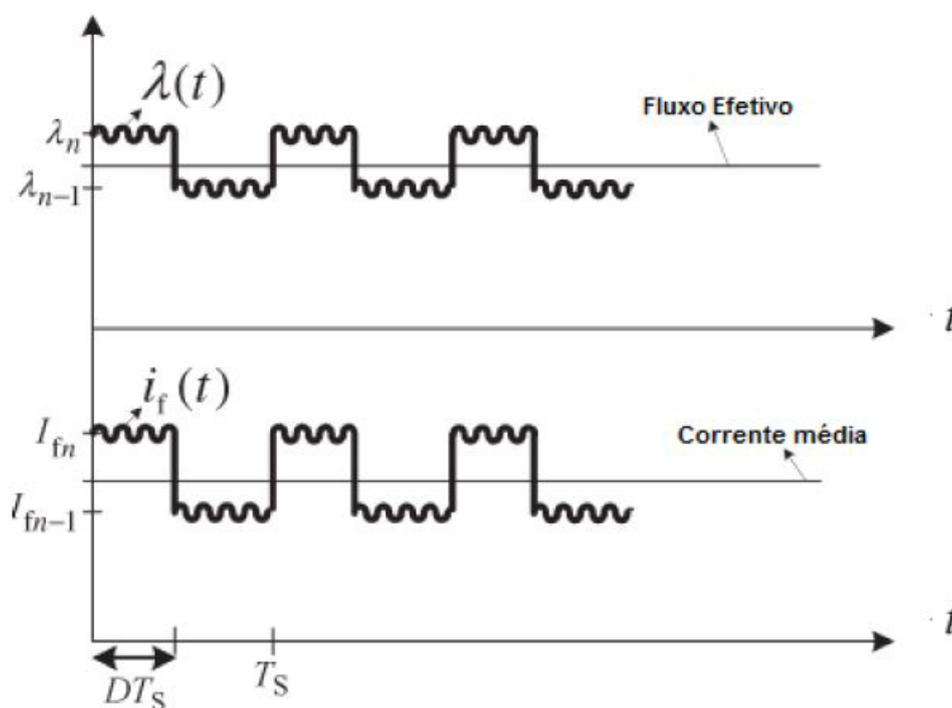


Figura 35: Dimerização *Bi nível* (CORDEIRO, 2014).

Segundo os trabalhos de (BUSO et al., 2008) e (TAN, 2010), esse método é mais eficiente do ponto de vista de menor variação cromática. Apesar das vantagens do método bi-nível, o sistema proposto nessa dissertação empregou a dimerização PWM, devido à sua maior simplicidade de implementação.

4.2.4 CONVERSOR PROPOSTO

Devido à aplicação prática exigida para este estudo era desejável que o driver construído fosse simples, de baixo custo, eficiente e capaz de manter a corrente nos LEDs bem regulada, apesar de perturbações elétricas e possíveis mudanças ambientais. Além disso, era muito importante que a quantidade de PPF obtida com o uso da luminária pudesse ser ajustada por um sinal de controle, uma vez que cada tipo de cultura possui a sua suplementação ideal de nível de luz. Assim, para integrar o sistema eletrônico representado na Figura 30, neste trabalho foi adotado o driver de LEDs da Figura 36, que se baseia em um conversor CC-CC (GARCIA et al., 2010).

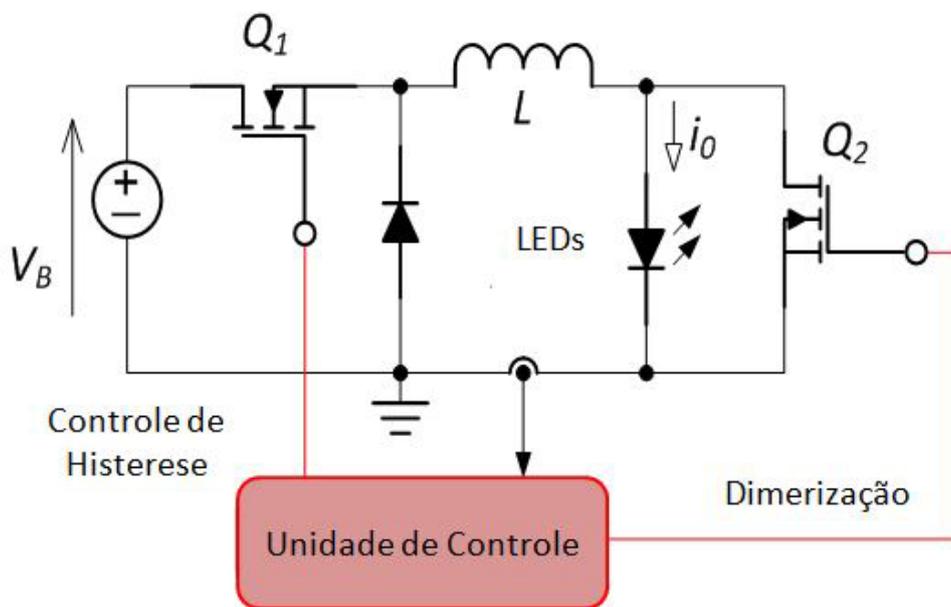


Figura 36: Esquema do driver dimerizável proposto (ALMEIDA et al., 2014).

Como pode ser observado, a tensão de barramento regulada V_B , fornece aos LEDs uma corrente de pico constante. Essa estratégia é empregada para assegurar o mínimo de desvio de cromaticidade, o que pode interferir nos níveis de PPF quando se faz necessário (ALMEIDA et al., 2011). Assim, a corrente do indutor deve ser monitorada continuamente pelo sistema de controle, que emprega uma ação de controle de histerese muito simples (OH, 2008), mantendo a corrente de pico nos LEDs em um valor fixo, embora permitindo uma certa ondulação de corrente em torno do ponto de operação. Foi empregado, neste projeto, um segundo interruptor Q_2 , que também pode ser observado em na Figura 36. Quando o interruptor Q_2 está aberto, a corrente dos LEDs é a mesma do indutor, e o cálculo da indutância é dado pela equação (4.3).

$$L = \frac{V_0 \cdot (1 - D)}{\Delta i_0 \cdot f_s} \quad (4.3)$$

Onde V_0 é a tensão total no módulo de LEDs, D é o ciclo de trabalho do conversor, dado pela equação (4.4)

$$D = \frac{V_0}{V_B} \quad (4.4)$$

e Δi_0 é a banda de histerese e f_s é a frequência de comutação desejada.

Através do cálculo do indutor, foi possível perceber que valores elevados de f_s resultam em menores valores de indutância, o que pode ser interessante em uma implementação prática, devido ao tamanho e redução de custos de elementos magnéticos. No entanto, valores excessivamente elevados de f_s normalmente acarretam em maiores perdas por comutação, reduzindo a eficiência global do conversor. Por fim, os dados do conversor são mostrados na tabela 10. Esses valores foram definidos de acordo com o as diretrizes de projeto, banda de histerese, recomendações e equações discutidas acima. A próxima seção apresentará a implementação final do driver.

Tabela 10: Parâmetros do projeto do conversor.

Parâmetros	Valor
Tensão de Entrada (V_B)	175 V
Indutância (L)	8,3 mF
Frequência de Comutação (f_s)	75kHz
Frequência de Dimerização (f_d)	10kHz
Corrente no Indutor (i_L)	350mA
Banda de Histerese (Δi_0)	20%

4.3 SIMULAÇÃO DO CONVERSOR PROJETADO

A fim de verificar o comportamento do conversor projetado, realizou-se uma simulação da topologia apresentada, com os valores dos componentes apresentados na Tabela 10.

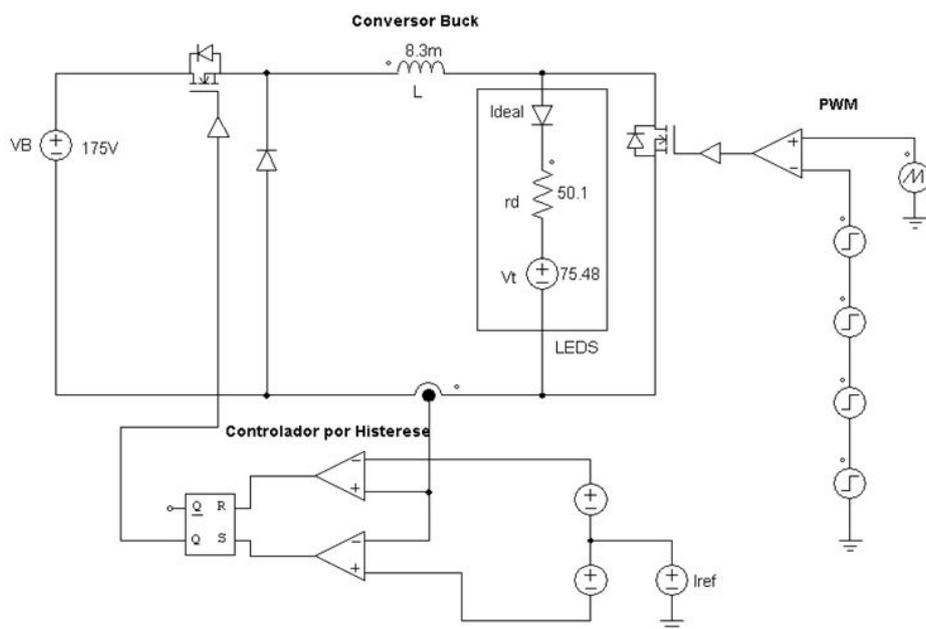


Figura 37: Modelo empregado na simulação do conversor projetado.

O modelo de simulação no software PSIM é mostrado na Figura 37, com os valores dos componentes e parâmetros projetados.

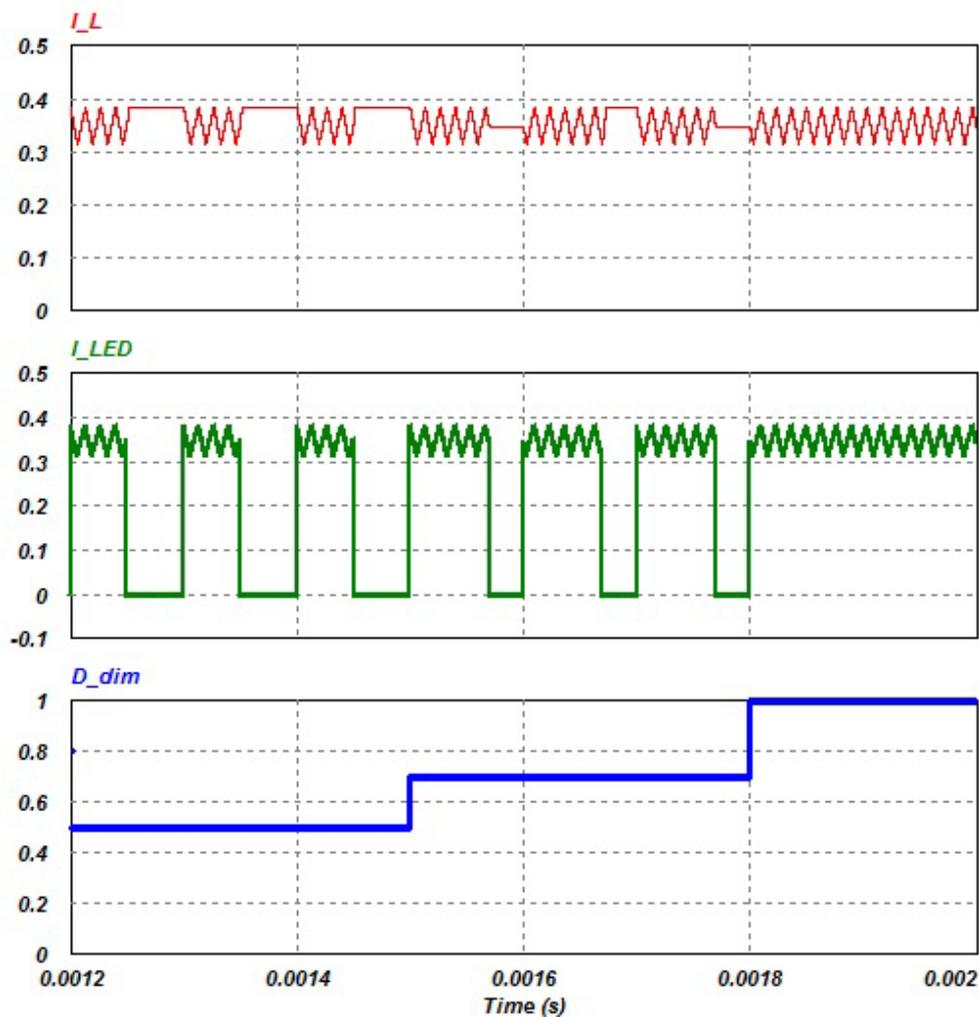


Figura 38: Formas de onda da simulação PSIM. De cima para baixo, a corrente do indutor, a corrente nos LEDs e o ciclo de trabalho.

Os principais resultados da simulação realizada no software PSIM são mostrados na Figura 38. Na simulação pode ser verificado o comportamento da corrente de saída do conversor de acordo com a variação do nível de dimerização que foram simulados ao longo do tempo total de simulação de 1 ms. Pode-se notar que a corrente no indutor I_L bem como a corrente de pico nos LEDs, I_{LED} , permaneceram rígidas, com valores médios de 350 mA e uma banda de histerese de 20%.

4.4 IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL DO CONVERSOR

Com base na metodologia apresentada na seção anterior, foi definida a implementação da topologia final do conversor Buck empregando dois interruptores, Q1 e Q2, e os controladores mencionados. Inicialmente o driver foi construído no software Altium

Designer. A estrutura do projeto final consistiu de um circuito de sensoriamento da corrente, Figura 39, que utiliza um sensor de corrente comercial do tipo INA193.

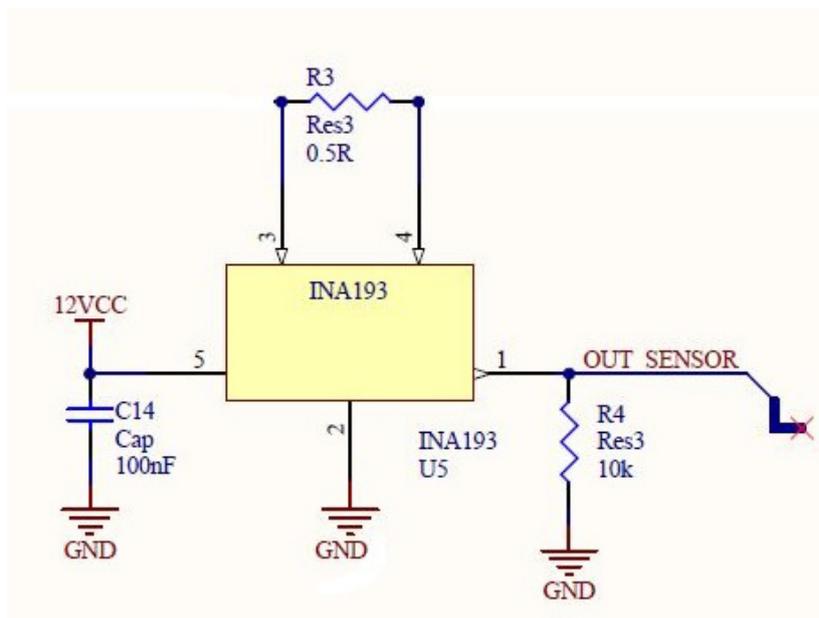


Figura 39: Esquemático do sensor de corrente.

Um circuito de controle por histerese, composto pelo amplificador operacional TL082, em conjunto com um Flip-flop 74279, é utilizado para a geração do sinal de controle. O sinal gerado é aplicado ao driver para acionamento do Transistor de Efeito Campo de Metal-Óxido-Semicondutor (do inglês, *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) (MOSFET) Q1, Figura 40.

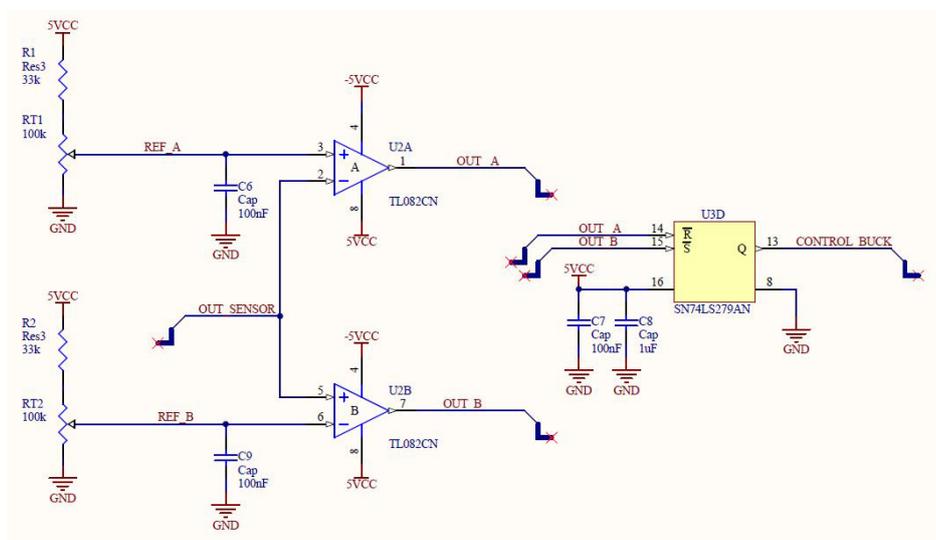


Figura 40: Esquemático do controlador de histerese.

E por fim, foi implementado um circuito de dimerização, mostrado na Figura 41 composto por um CI TL494 (circuito de modulação de largura de pulso). O sinal gerado pelo CI é responsável pelo acionamento do MOSFET Q2. A frequência utilizada no circuito de controle por largura de pulso foi fixada em 10kHz. No apêndice B encontra-se o esquemático completo do conversor.

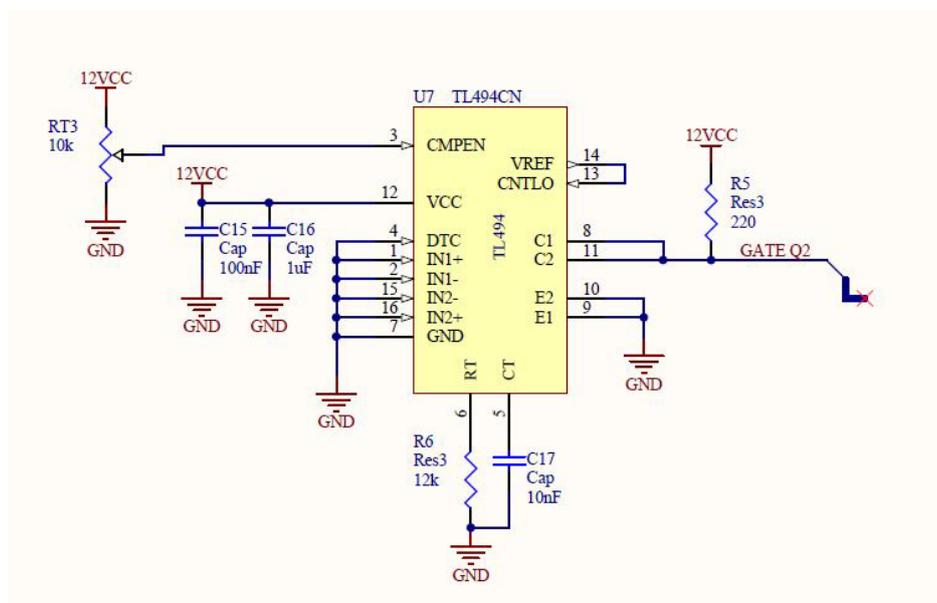


Figura 41: Esquemático do circuito de dimerização.

A próxima seção apresentará alguns resultados experimentais em relação às estratégias de controle do conversor dos LEDs mencionados nas seções anteriores.

4.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS COM O PROTÓTIPO

Nesta seção, a implementação prática do conversor e a realização dos testes obtidos em laboratório será mostrada. Uma fotografia do protótipo é apresentada na Figura 42.

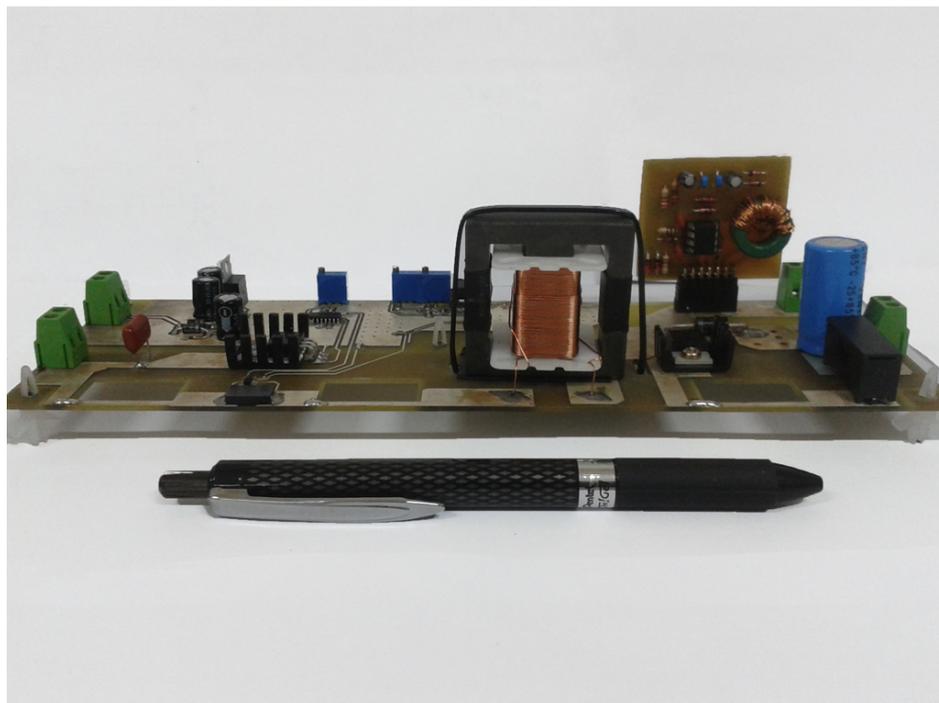


Figura 42: Foto do protótipo do conversor Buck.

A seguir, são apresentadas as formas de ondas dos resultados experimentais obtidos com o protótipo construído. Na Figura 43, são mostradas a tensão e a corrente do módulo de LEDs usando o controlador de histerese a plena carga (sem dimerização). Observa-se que o valor médio da corrente é de 368 mA, dentro de uma margem de 5% do valor de teórico previsto (350 mA). Por outro lado, é possível avaliar também que a banda de histerese da corrente é de 20% do valor nominal, ou seja, 69 mA. A frequência de comutação real foi de cerca de 87 kHz. Observa-se que a corrente se manteve dentro da banda projetada.

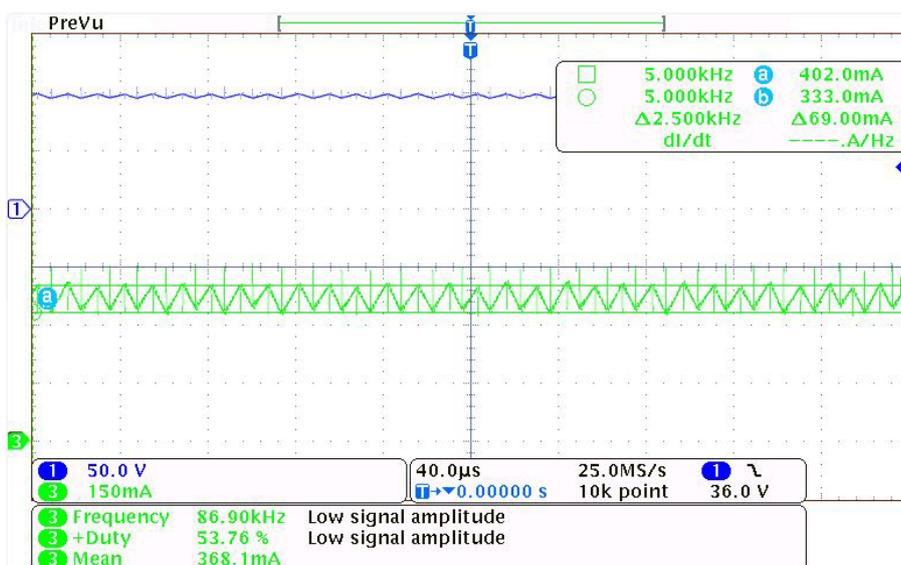


Figura 43: Tensão (CH1-50 V/div) e corrente nos terminais dos LEDs (CH2-150 mA/div).

Na Figura 44 são mostradas as formas de onda na saída da célula de comutação (isto é, a tensão através do diodo), juntamente com o sinal de dimerização para a porta do MOSFET paralelo e a corrente do indutor para um nível de intensidade de 50%. A figura apresenta o comportamento do conversor controlado pelo controle de histerese quando o interruptor paralelo é acionado (a 10 kHz, com 50% do ciclo de trabalho) para ajustar o nível de luz.

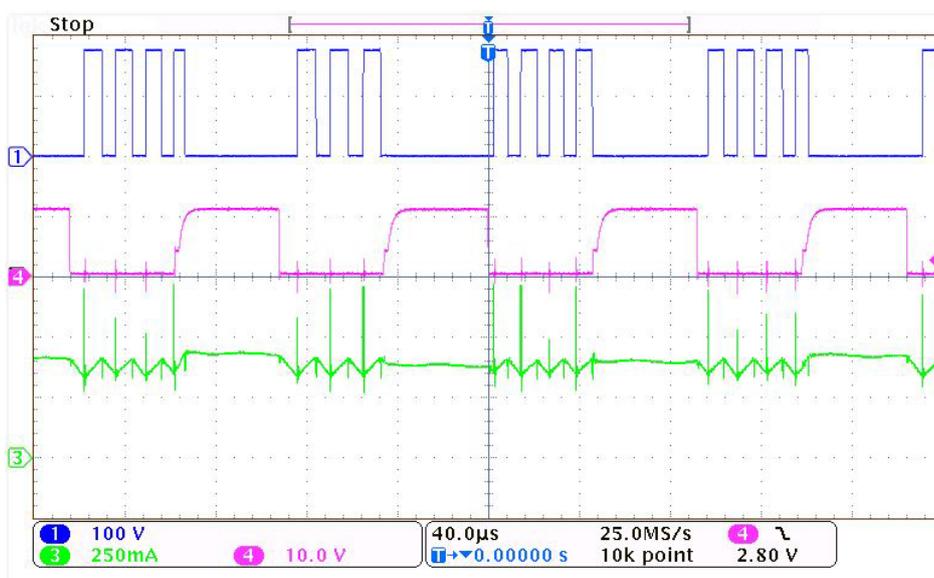


Figura 44: Tensão nos terminais do diodo (CH1-100V/div), tensão nos terminais MOSFET Q2 (CH2-10V/div) e corrente pelo indutor (CH3-250 mA/div).

Na Figura 45, são apresentadas as formas de onda da tensão na saída da célula de comutação e o sinal de seleção do interruptor paralelo de 10 kHz, com 50% de ciclo de trabalho. Também é mostrada a corrente na carga, que é desviada pelo interruptor paralelo para atingir dimerização do nível de luz (50% de dimerização).

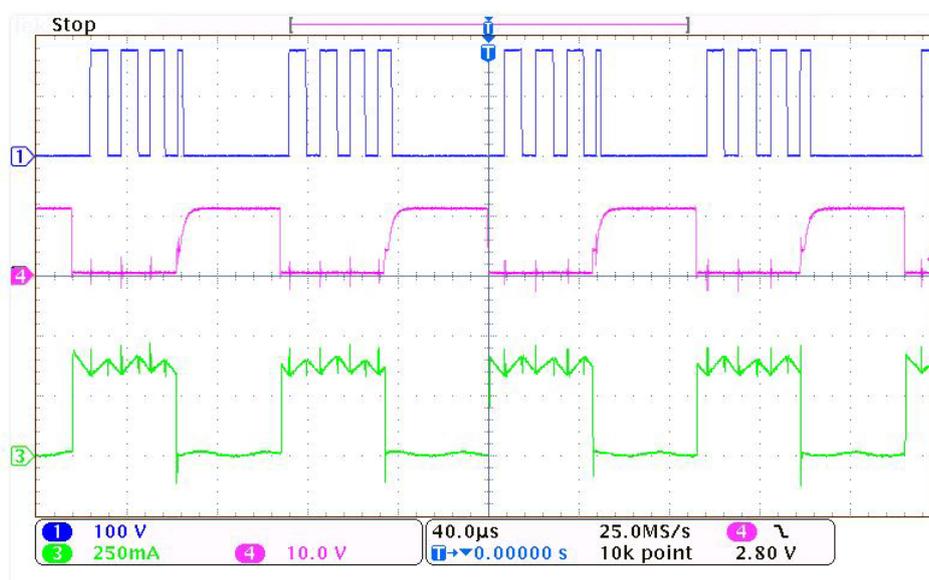


Figura 45: Tensão nos terminais do diodo (CH1-100V/div), tensão nos terminais MOSFET Q2 (CH2-10V/div) e corrente pelos LEDs (CH3-250 mA/div).

O conversor foi analisado para vários níveis de dimerização, variando de 10% (menor nível de iluminação) a 100% (sem dimerização, interruptor desligado). Na Figura 46, por exemplo, é apresentada as formas de onda da tensão no diodo e corrente no interruptor principal do conversor buck para um nível de dimerização de 50%.

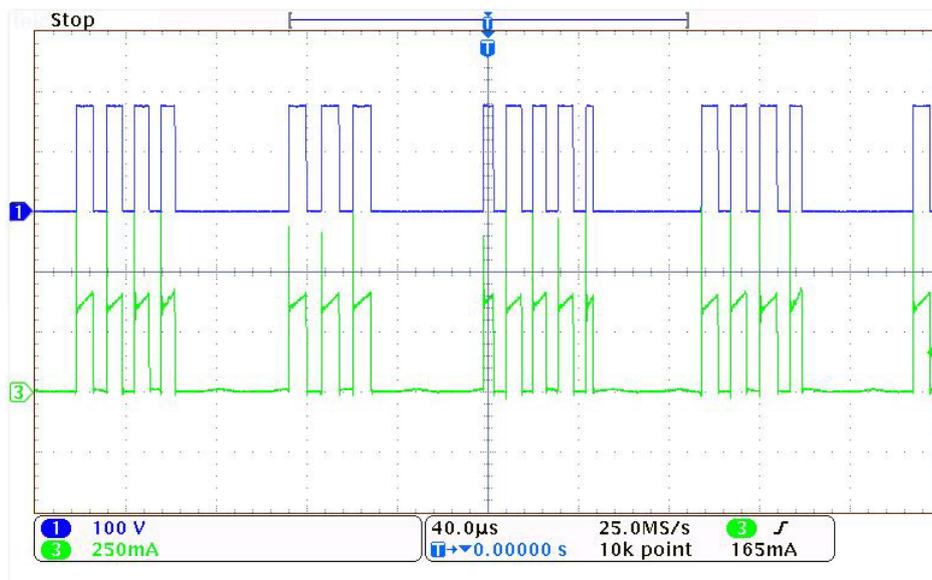


Figura 46: Tensão nos terminais do diodo (CH1-100V/div) e corrente pelo interruptor Q1 (CH1-250mA/div).

Já na Figura 47, são apresentadas a forma de onda de tensão nos terminais do diodo e a corrente pelo interruptor Q1, a plena carga (sem dimerização).

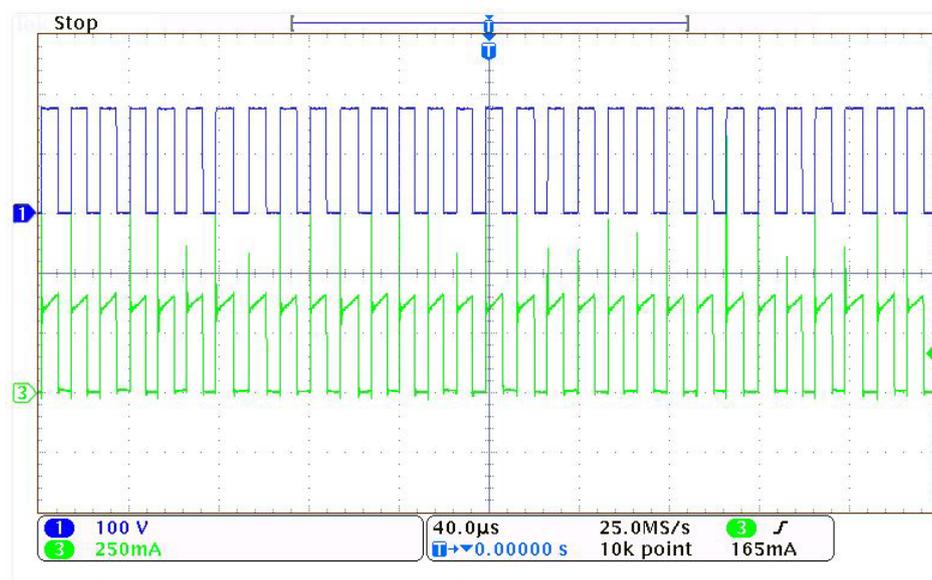


Figura 47: Tensão nos terminais do diodo (CH1-100V/div) e corrente pelo interruptor Q1 (CH1-250mA/div)

O comportamento da iluminância normalizada (medida com um amplificador fotodiodo *TSL13-S*) é apresentado na Figura 48, que mostra linearidade, conforme esperado. O conversor também permitiu um controle preciso do nível de iluminação a

partir de valores muito baixos de corrente média (10%, a 35 mA) até o nível mais elevado (100%, a 350 mA). A grande faixa de excursão da corrente de saída foi alcançada devido à estratégia de controle que utiliza, de maneira combinada, um controlador por histerese e a técnica de dimerização PWM.

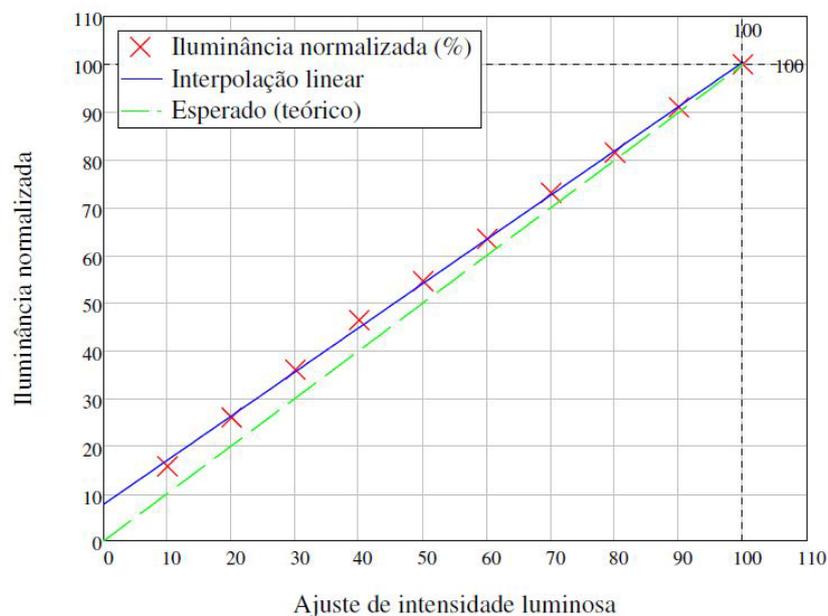


Figura 48: Ajuste de intensidade luminosa versus iluminância normalizada.

A Figura 49 mostra a curva de eficiência do protótipo para toda faixa de excursão da potência de saída. A eficiência atingiu pico de 95%, com carga total (sem dimerização). Essa curva cai naturalmente quando a potência de saída é reduzida devido à dimerização. As perdas de conversão (que são quase constante ao longo de toda a faixa de operação) dominam sobre a potência de carga. O valor mais baixo da eficiência foi de 57% para um nível de dimerização de 10%.

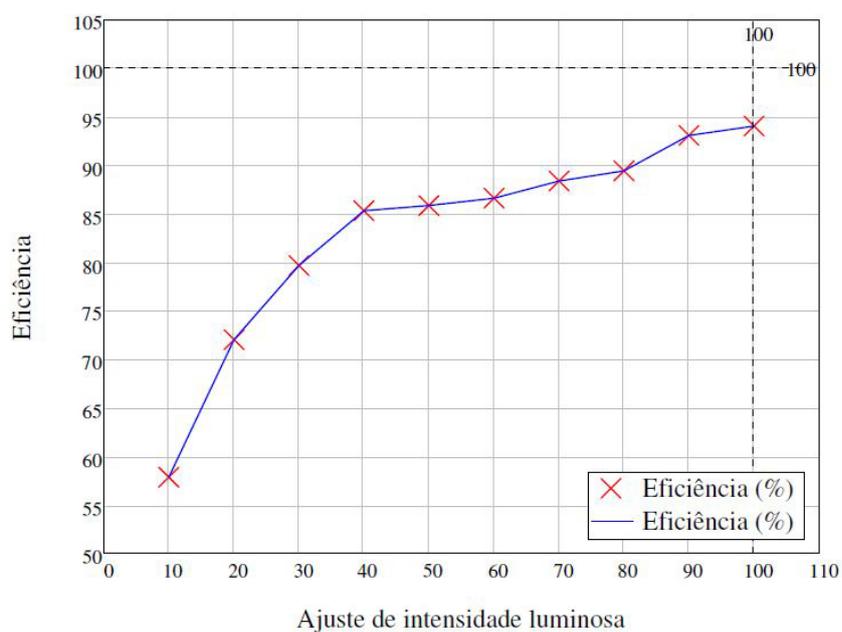


Figura 49: Ajuste de intensidade luminosa versus eficiência do conversor.

Na Figura 50 é mostrado o comportamento da corrente média nos LEDs ao longo do ajuste de luminosidade. Com base nos valores experimentais obtidos foi possível observar uma relação linear entre as variáveis.

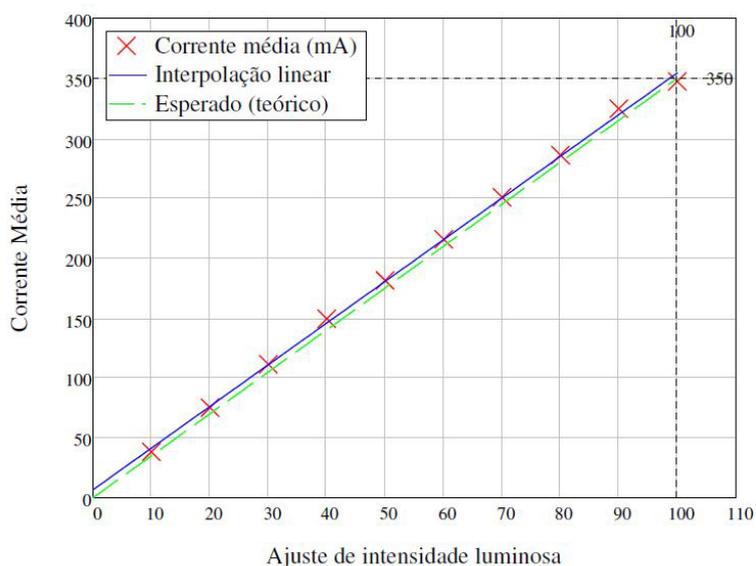


Figura 50: Ajuste de intensidade luminosa versus corrente média.

O comportamento do fluxo luminoso ao longo do ajuste de intensidade luminosa é apresentado na Figura 51. De acordo com os dados obtidos, o fluxo luminoso apresentou

uma resposta linear em relação a AIL.

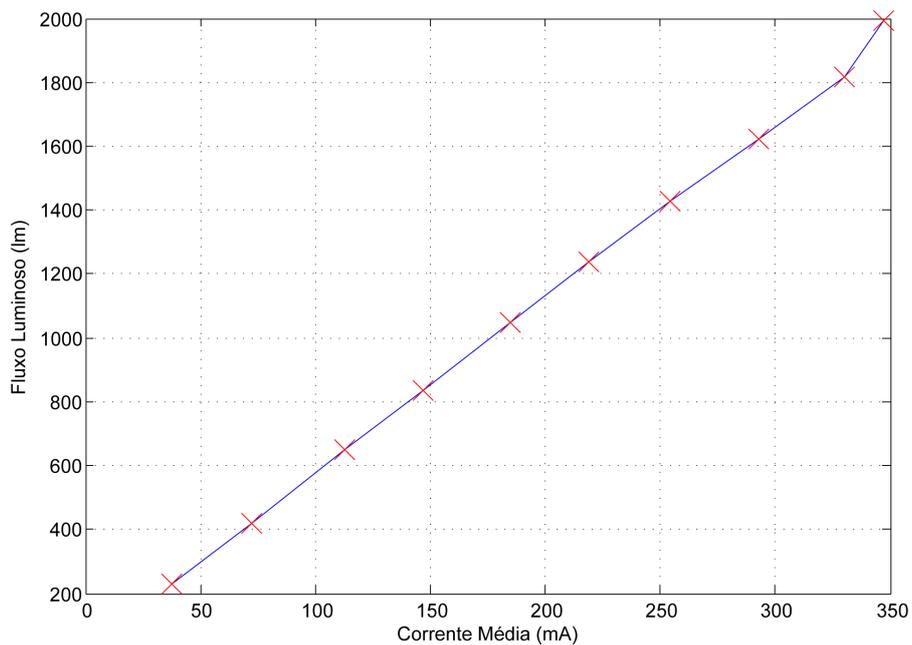


Figura 51: Ajuste de intensidade luminosa versus fluxo luminoso.

Um gráfico da variação do nível de iluminação em relação ao nível de PPF detectado pelo difusor cossenoidal é mostrado na Figura 52. Com esses dados foi possível observar que o comportamento do nível fluxo de fótons fotossintético ao longo da gama de escurecimento não é linear. O conversor foi capaz de gerar flexibilidade através da possibilidade de variação de PPF, sendo assim, possível adequar o nível de iluminação para diferentes cultivos.

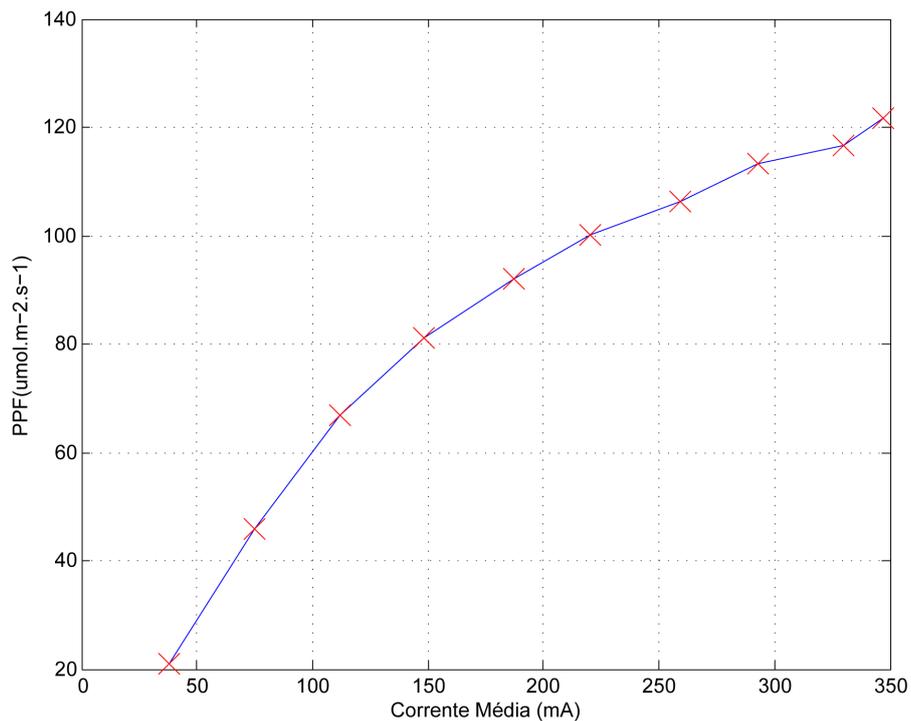


Figura 52: Ajuste de intensidade luminosa versus nível de PPF.

Também foi analisado o desvio de cromaticidade do módulo de LEDs conforme o nível de dimerização. Foi utilizada a técnica de dimerização por PWM, que segundo estudos anteriores, garante uma boa estabilidade cromática. Na Tabela 11 os dados obtidos mostram o comportamento da variação de cromaticidade ao longo do ajuste de intensidade luminosa. Como resultado observou-se que a máxima variação nas coordenadas cromáticas foram: Coordenada X_c , igual a 0.06% e Y_c , igual a 0.12%, mostrando um desvio mínimo ao longo do ajuste de luminosidade.

Tabela 11: Variação de cromaticidade.

Nível de Intensidade Luminosa (%)	Corrente Média (mA)	X_c	Y_c
10	37,8	0,3398	0,3832
20	72,3	0,3397	0,3829
30	113	0,3396	0,3828
40	147	0,3396	0,3827
50	185	0,3396	0,3826
60	219	0,3395	0,3825
70	254	0,3395	0,3824
80	293	0,3394	0,3822
90	330	0,3393	0,3821
100	347	0,3392	0,3820

4.6 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Neste capítulo foi apresentado o projeto, a simulação e os resultados obtidos do conversor aplicado no acionamento dos LEDs. A simulação apresentada adotou algumas condições de escurecimento, como resposta foram obtidos a corrente no indutor, a corrente de pico nos LEDs, que permaneceu rígida, com valor médio de 350 mA. A partir da implementação prática do conversor, foi possível verificar que seu funcionamento foi adequado, a alta eficiência, número reduzido de componentes, a simplicidade e a flexibilidade conforme desejado no projeto. A tensão de entrada no conversor foi de 175 V. Os resultados foram analisados em vários níveis de escurecimento, variando de 10% (menor nível de iluminação) a 100% (sem dimerização, interruptor desligado). O comportamento do conversor mais a malha de controle de histerese, quando o interruptor de escurecimento paralelo é acionado, também foi analisado.

Como resultado de destaque, foi determinado o nível de PPF detectado pelo difusor cossenoidal ao longo da variação da intensidade luminosa. Esse resultado é importante para utilização da luminária em diferentes cultivos, uma vez que o nível de PPF pode ser alterado, podendo, assim ser utilizado em pesquisas na área de fisiologia vegetal envolvendo luz artificial, sem que seja necessário fazer uso de diferentes luminárias.

A utilização da estratégia de controle empregando a técnica de modulação por largura de pulso garante um mínimo de desvio de cromaticidade quando a aplicação de escurecimento se faz necessária, como por exemplo em experiências de fisiologia de plantas.

O sistema eletrônico proposto neste trabalho consiste em um controlador de rápida dinâmica e bastante precisão, o que foi conseguido graças à seleção correta dos parâmetros e dos controladores empregados no equipamento.

5 CONCLUSÃO

5.1 VISÃO GERAL DA DISSERTAÇÃO

No primeiro capítulo foram apresentadas as motivações e objetivos deste trabalho. Foi apresentado um breve estado da arte dos LEDs e suas características mais relevantes para contribuição e concretização deste trabalho. Esse primeiro capítulo também abordou, de maneira sucinta, a interação entre a luz e as plantas.

O segundo capítulo se propôs a esclarecer alguns pontos bastante pertinentes, como os comprimentos de onda que impulsionam as atividades fotossintéticas nas plantas e a descrição dos processos mais relevante para o seu desenvolvimento. Esse capítulo teve como objetivo apresentar os principais tópicos para geração de maior produtividade e qualidade de culturas, de acordo com a inserção adequada da quantidade de luz artificial, apresentando os sistemas de medição de luz propostos pela comunidade científica.

O terceiro capítulo desta dissertação, apresentou um resumo sobre a interação de diferentes fontes de luz artificial em fisiologia vegetal. Exibiu o sistema de medição de radiação fotossinteticamente ativa utilizado e todos os resultados obtidos após a avaliação das luminárias comerciais no aparato de medição.

O quarto capítulo apresentou o sistema eletrônico proposto, os resultados da simulação e os resultados da implementação prática do conversor. Com base nos dados obtidos, foi possível perceber que o sistema desenvolvido atendeu as premissas de projeto, uma vez que o driver de LEDs foi eficiente, de baixo custo e agregou maior flexibilidade para utilização futura em estudos de fisiologia vegetal empregando luz artificial.

5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi apresentado no decorrer dos capítulos a relevância da tecnologia LED para aplicação em diversas áreas, inclusive em fisiologia vegetal, e uma revisão sobre a

interação entre a luz e a fotossíntese das plantas superiores. Além disso, alguns aspectos sobre o uso de iluminação de estado sólido como suplemento artificial para o crescimento das plantas também foram abordados e discutidos.

Algumas luminárias de LEDs comerciais foram avaliadas por meio de um conjunto especializado de instrumentos radiométricos e os resultados foram relatados neste documento. O módulo de LEDs escolhido para estudo forneceu um fluxo de fótons fotossintético cerca de $100 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ o que é compatível com o nível utilizado para iluminação em diversas culturas.

O conversor eletrônico apresentado exibiu excelentes resultados, empregando um controlador com rápida dinâmica e bastante precisão, o que é explicado pela seleção correta dos parâmetros e dos controladores do projeto.

5.3 TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se o desenvolvimento dos seguintes procedimentos, de modo a complementar os resultados obtidos com o equipamento proposto:

- Implementar um sistema eletrônico RGB, com ajuste de cor e dimerização automatizado.
- Implementar uma alternativa de dimerização *Bi-level*, reduzindo a variação em cromaticidade.
- Buscar cooperação com grupos de pesquisas em fisiologia vegetal, visando à avaliação do desempenho dos sistemas propostos.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. C. et al. Led-based electronic system to support plant physiology experiments. In: *Industrial Electronics (ISIE), IEEE 23rd International Symposium on*. 2014. p. 531–536.
- ALMEIDA, P. Conversor integrado sepic buck-boost aplicado ao acionamento de leds de potência em iluminação pública. *Faculdade de Engenharia*, p. 158, 2012.
- ALMEIDA, P. S. et al. An experimental study on the photometrical impacts of several current waveforms on power white leds. In: IEEE. *Power Electronics Conference (COBEP), 2011 Brazilian*. 2011. p. 728–733.
- BENDER, B. Metodologia de projeto eletrotérmico de leds aplicada ao desenvolvimento de sistemas de iluminação pública. *Master Electrical Engeneering Degree–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria*, 2012.
- BIOGEO. *Recursos de apoio à disciplina de Biologia e Geologia- Fotosíntese Estrutura do Cloroplasto*. 2012. <http://biogeolearning.com/site/v1/biologia-10o-ano-indice/unidade-1-obtencao-de-materia/fotossintese-estrutura-do-cloroplasto/>. [Acessado: 13-02-2014.].
- BROWN, C. S.; SCHUERGER, A. C.; SAGER, J. C. Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, American Society for Horticultural Science, v. 120, n. 5, p. 808–813, 1995.
- BUSO, S. et al. Performance degradation of high-brightness light emitting diodes under dc and pulsed bias. *Device and Materials Reliability, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 8, n. 2, p. 312–322, 2008.
- COATON, J. R.; MARSDEN, A. M. *Lamps and Lighting, 4th ed.* : London,U.K.: Butterworth-Heinemann, 2001.
- CORDEIRO, R. G. Sistema rgb com controle de fluxo luminoso indireto e redução de variação cromática. Dissertação (Mestrado)—PPGEE/UFSM, Santa Maria/RS, Brasil, 2014., 2014.
- COSTA, C. A. D. Eficiência energética e novas tecnologias. *Seminário de eficiência energética e novas tecnologias*, 2009.
- COSTA, G. da; CUELLO, J. The point irradiance and the phytometric system. In: *V International Symposium on Artificial Lighting in Horticulture 711*. 2005. p. 455–460.
- COSTA, G. J. C. da. *Iluminação econômica: cálculo e avaliação.* : EDIPUCRS, 2006.
- COSTA, G. J. C. da. Comissão internacional de iluminação estuda sistema fitométrico-método criado por professor da faculdade de engenharia relaciona-se à produção de plantas. *Revista da Pontifica Universidade Católica do Rio Grande do Sul*, 2007.

- COSTA, G. J. da; CUELLO, J. L. The phytometric system: A new concept of light measurement for plants. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Taylor & Francis, v. 33, n. 1, p. 34–42, 2004.
- DIAS, M. P. Avaliação do emprego de um pré-regulador boost de baixa frequência no acionamento de leds de iluminação. 2012.
- DORAIS, M.; GOSSELIN, A. Physiological response of greenhouse vegetable crops to supplemental lighting. In: *IV International ISHS Symposium on Artificial Lighting 580*. 2000. p. 59–67.
- FERREIRA, A. R.; TOMIOKA, J. Iluminação de estado sólido, economia potencial de energia elétrica para o país. 2013.
- GARCIA, J. et al. Integrated driver for power leds. In: IEEE. *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. 2010. p. 2578–2583.
- GROWINGLIGHTS, P. 2012. <http://progressivegardening.com/plantgrowinglights.html>. [Acessado: 08-08-2014.].
- GRZESIAK, W. et al. Application of pv powered high intensity leds for supplementary irradiation of horticultural plants. In: IEEE. *Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on*. 2006. v. 2, p. 2400–2403.
- HART, J. W. et al. *Light and plant growth*. : Unwin Hyman Ltd., 1988.
- IESNA. *IESNA Technical Memorandum on Light Emitting Diode (LED) Sources and Systems*. 2005.
- KOCHER, M. J.; STEIGERWALD, R. L. An ac to dc converter with high quality input waveforms. In: *PESC'82; 13th Annual Power Electronics Specialists Conference*. 1982. v. 1, p. 63–75.
- LECLAIRAGE, C. I. de. Terminology for photosynthetic active radiation for plants. In: . 1993. v. 106/8.
- LI, Y. et al. Effect of led supplemental illumination on the growth of strawberry plants. In: IEEE. *Photonics and Optoelectronics (SOPO), 2012 Symposium on*. 2012. p. 1–4.
- LIAN, M.-L.; MURTHY, H.; PAEK, K.-Y. Effects of light emitting diodes (leds) on the in vitro induction and growth of bulblets of *lilium* oriental hybrid 'pesaro'. *Scientia Horticulturae*, Elsevier, v. 94, n. 3, p. 365–370, 2002.
- LODISH, H. *Molecular cell biology*. : Macmillan, 2012.
- LU, D.-C.; MOLAVI, B. Hysteresis control of single-stage power-factor-corrected converters. In: IEEE. *Industrial Electronics and Applications, 2007. ICIEA 2007. 2nd IEEE Conference on*. 2007. p. 943–948.
- LUMILEDS, P. 2010. http://ritelites.com/yahoo_site_admin/assets/docs/WP_on_LED_life.3482523. [Acessado: 01-08-2014.].

- LUN, W.-K. et al. Bilevel current driving technique for leds. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 24, n. 12, p. 2920–2932, 2009.
- MASSA, G. D. et al. Plant productivity in response to led lighting. *HortScience*, American Society for Horticultural Science, v. 43, n. 7, p. 1951–1956, 2008.
- MCCREE, K. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agricultural Meteorology*, Elsevier, v. 10, p. 443–453, 1972.
- MOGO, S. *Radiometria e Fotometria - Percepção Visual*. 2013. <http://webx.ubi.pt/~smogo/disciplinas/alunos/Radiometria.pdf/>. [Acessado: 13-02-2014].
- MORROW, R. C. Led lighting in horticulture. *HortScience*, American Society for Horticultural Science, v. 43, n. 7, p. 1947–1950, 2008.
- NICHIA. Nichia corporation specification for warm white leds sts-da1-2548a <cat.no.120731>. In: . 2013.
- NICHIA, N. C. *NICHIA HISTORY*. 1996. http://www.nichia.co.jp/en/about_nichia/history.html. [Acessado: 07-02-2014].
- OH, I.-H. An analysis of current accuracies in peak and hysteretic current controlled power led drivers. In: IEEE. *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2008. APEC 2008. Twenty-Third Annual IEEE*. 2008. p. 572–577.
- PINHO, P. et al. Usage and control of solid-state lighting for plant growth. Teknillinen korkeakoulu, 2008.
- PINHO, P.; TETRI, E.; HALONEN, L. Design and performance assessments of solid state light sources for plant growth. *Lux Europa*, p. 19–21, 2005.
- PINHO T. ROSVALL, E. T. M. E. P.; HALONEN, L. Light emitting diodes in plant growth: Comparative growth test in greenhouse and evaluation of photosynthetic radiation. *Helsinki University of Technology, Department of Electronics – Lighting Unit, Espoo, Tech.*, 2008.
- PINTO, R. A. Projeto e implementação de lâmpadas para iluminação de interiores empregando diodos emissores de luz (leds). Dissertação (Mestrado)—PPGEE/UFMS, Santa Maria/RS, Brasil, 2008. 99, 2008.
- SCHUBERT, E. F. *Light-emitting diodes (2ª ed.)*. : Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- SHIMADA, A.; TANIGUCHI, Y. 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*, Elsevier, v. 104, n. 3, p. 399–404, 2011.
- SIMPSON, R. S. *Lighting control: technology and applications*. : Taylor & Francis, 2003.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Plant Physiology*. : Sunderland, Massachusetts,USA. Sinauer Associates Inc, 2006.

TAN, S.-C. General-level driving approach for improving electrical-to-optical energy-conversion efficiency of fast-response saturable lighting devices. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 57, n. 4, p. 1342–1353, 2010.

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

YORIO, N. C. et al. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (leds) with blue light supplementation. *HortScience*, American Society for Horticultural Science, v. 36, n. 2, p. 380–383, 2001.

APÊNDICE A – PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA

A.1 ARTIGOS EM CONGRESSOS INTERNACIONAIS

A.1.1 ARTIGO PUBLICADO IEEE/ISIE.

Camila C. Almeida, Pedro. S. Almeida, Nicolas R. C. Monteiro, Milena F. Pinto and Henrique A. C. Braga. "LED-Based Electronic System to Support Plant Physiology Experiments". *Industrial Electronics (ISIE), IEEE 23rd International Symposium on*, 2014, p. 531 - 536.

Abstract: This paper proposes an electronic system intended to provide a simplified and efficient alternative for plant physiology experiments, as well as to be used in greenhouse conventional processes. The text starts with a description regarding the interaction between artificial lighting and cultivation of vegetables, either for agricultural-oriented purposes or to help the interpretation of plants behavior in botanical studies. This first study helps to characterize the main radiometric quantities of interest, with a predominant orientation for growing vegetables when artificial lighting is used as a supplement or as a sole lighting source. Hence, based on some previous works, it is proposed a standalone system intended to drive a lighting fixture consisting of white power LEDs or mixed-color LED unities. Moreover, the paper also includes some preliminary radiometric experiments concerning a possible commercial LED, which is intended to be used in association with the proposed lighting fixture. The results should indicate if the LED brands are enough to excite a good photosynthetic response. Hence, the most relevant parameters are measured, such as the photosynthetic photon flux, luminous flux, lamp color rendering and color correlated temperature. It is expected that the developed prototype be able to present features that add flexibility, automation and radiometric relevance to some selected vegetable crops.

A.1.2 ARTIGO SUBMETIDO AO IEEE/INDUSCON.

Camila C. Almeida, Pedro S. Almeida, Milena F. Pinto, Rodolfo L. Valle, Carlos H.N.Martins and Henrique A. C. Braga. "A Fast Dynamics and PWM-Dimmable LED Driver for Accurate Control of Illumination in Plants Physiology Experiments". *INDUSCON, IEEE*, 2014.

Abstract: This work presents an electronic system in order to provide a simplified and efficient alternative for plants physiology experiment as well as for its utilization in greenhouses. Initially, it is shown a brief description regarding the artificial lighting and plants cultivation interaction, aiming for the interpretation about plants behavior in botanic studies and to help the oriented and commercial crops purposes. Based on some previous work, it is proposed an autonomous system comprised of a white LEDs lighting fixture. Moreover, this paper includes the prototype experimental results in order to evaluate converter efficiency and radiometric lamp behavior. Thus, the results has shown that the developed system is able to integrate flexibility, accurate control and relevant radiometric for some selected crops.

APÊNDICE B - ANEXO

