

METODOLOGIA DE PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE LUZ FLEXÍVEL BASEADO EM DIODOS EMISSORES DE LUZ

Klaus Tesser Martin^{1,2}, Olinto César Bassi de Araújo², Saul Azzolin Bonaldo², Marcelo Freitas da Silva²

¹Instituto Federal Farroupilha (IFFar – Campus Jaguari), Jaguari – RS, Brasil

²Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria – RS, Brasil

e-mail: klaustm@gmail.com

Resumo – Este trabalho apresenta a concepção e o desenvolvimento de um sistema de iluminação baseado em diodos emissores de luz (LEDs) capaz de reproduzir espectros da luz com precisão para aplicações que exigem um espectro da luz específico. A metodologia proposta utiliza Programação Matemática, através de um modelo de Programação Linear Inteira Mista, para obter a combinação ótima de modelos de LEDs que resultam no espectro mais próximo possível da referência. Os LEDs de cada modelo selecionado pelo procedimento de otimização são acionados por um sistema eletrônico composto por conversores Buck com controle de corrente por histerese e controle de intensidade luminosa por Modulação por Largura de Pulso. O controle independente de cada modelo de LED permite a possibilidade de variar a intensidade e a distribuição espectral da luz, agregando flexibilidade ao sistema de iluminação. Como aplicação prática, um sistema é desenvolvido para reproduzir o espectro da luz solar para diferentes horários do dia. Os testes para validação da metodologia proposta demonstraram que é possível reproduzir determinados espectros com fidelidade, com um erro relativo médio de 12% entre o espectro projetado e o espectro referência, considerando os modelos de LED disponíveis.

Palavras-Chave – Diodos Emissores de Luz, Iluminação de Estado Sólido, Programação Linear Inteira Mista, Simulação de Espectro.

DESIGN METHODOLOGY AND DEVELOPMENT OF A FLEXIBLE LIGHT SIMULATOR BASED ON LIGHT-EMITTING DIODES

Abstract – This work presents the design and development of a lighting system based on light emitting diodes (LEDs) capable of accurately reproducing light spectra for applications that require a specific light spectrum. The proposed methodology uses Mathematical Programming, using a Mixed Integer Linear Programming model, to obtain the optimal combination of LED models that result in the spectrum as close as possible to the reference. The LEDs of each model selected by the optimization procedure are driven by an electronic

system composed of Buck converters with current control by hysteresis and control of light intensity by Pulse Width Modulation. The independent control of each LED model allows the possibility to vary the intensity and the spectral distribution of the light, adding flexibility to the lighting system. As a practical application, a system is developed to reproduce the spectrum of sunlight for different times of the day. Tests to validate the proposed methodology demonstrated that it is possible to reproduce certain spectra with fidelity, with an average relative error of 12% between the designed spectrum and the reference spectrum, considering the LED models available.

Keywords – Light-Emitting Diodes, Mixed Integer Linear Programming, Solid State Lighting, Spectrum Simulation.

I. INTRODUÇÃO

Os diodos emissores de luz de alta potência estão se tornando cada vez mais populares para aplicações de iluminação devido às suas muitas vantagens, como tamanho compacto, peso reduzido, resistência mecânica, longa vida útil e intensidade de radiação facilmente modulada [1], [2]. Os LEDs têm sido amplamente utilizados para aplicações de iluminação geral, como iluminação pública, sinalização automotiva, telas e iluminação arquitetural [3]-[7]. Outras tecnologias de lâmpadas, como fluorescente, sódio de alta pressão (HPS) e descarga de alta intensidade (HID) exibem características como vida útil relativamente curta, presença de materiais tóxicos em sua composição - o que torna a disposição adequada dispendiosa - e um grande tamanho físico em relação à quantidade de luz produzida. Além disso, a luz emitida por essas lâmpadas possui uma ampla distribuição de energia espectral (SPD - do inglês *Spectral Power Distribution*), como pode ser visto na Figura 1.

Os LEDs, por outro lado, emitem luz com uma distribuição espectral estreita, quase monocromática. A Figura 2 mostra o SPD de alguns modelos diferentes de LED disponíveis no mercado. Essa característica de distribuição espectral estreita é de particular interesse para certas aplicações que requerem um sistema de iluminação com um SPD específico. Por exemplo, em aplicações hortícolas, através do controle adequado do espectro da luz, é possível manipular as diferentes respostas de plantas como fotossíntese, regulação da floração e frutificação [8], [9]. Além disso, caracterização e teste de painéis fotovoltaicos [10], pesquisas sobre o ritmo circadiano [11] e aquicultura são aplicações que requerem um

Manuscript received 04/23/2020; first revision 07/31/2020; accepted for publication 09/01/2020, by recommendation of Editor Demercil de Souza Oliveira Jr. <http://dx.doi.org/10.18618/REP.2020.3.0025>

sistema de iluminação cujo espectro seja semelhante ao espectro da luz solar.

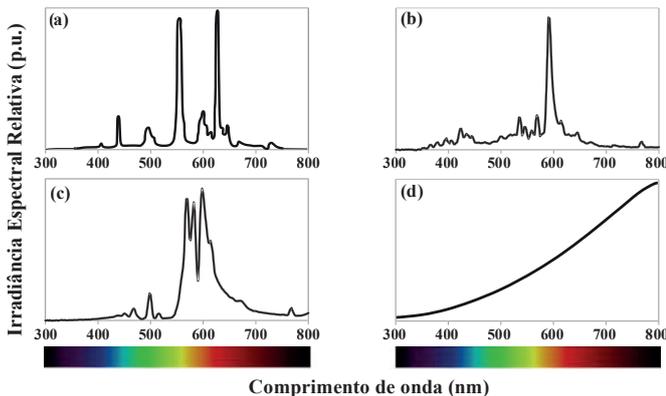


Fig 1. Distribuição de energia espectral para lâmpadas fluorescentes (a), HID (b), HPS (c) e incandescentes (d).

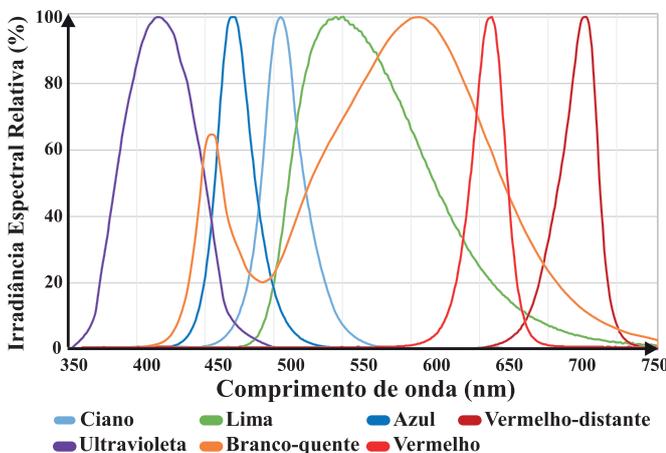


Fig 2. Distribuição de energia espectral para diferentes modelos de LED disponíveis no mercado.

Na literatura, os trabalhos que utilizam sistemas de iluminação artificial para reprodução de espectros específicos da luz buscam, em quase todos os casos, reproduzir o espectro da luz solar. Basicamente, a pesquisa em simuladores solares foi impulsionada pela necessidade de testes internos de painéis fotovoltaicos. Os simuladores solares mais relatados usam lâmpadas de tungstênio, sódio ou xenônio [12]-[17]. No entanto, as principais desvantagens dessas tecnologias de lâmpadas são variações nas características espectrais, baixa eficiência, alterações no desempenho com o envelhecimento, vida útil curta e alta carga de calor [14]. Além disso, o uso dessas tecnologias de iluminação requer filtros ópticos para alterar a forma da distribuição espectral.

O desenvolvimento de LEDs e suas características os tornam uma solução interessante para simular a luz do sol por uma fonte de vários LEDs com combinação adequada de comprimentos de onda. Os LEDs já foram usados como fonte de radiação para simuladores solares em laboratórios de pesquisa para testar a característica de corrente versus tensão de módulos fotovoltaicos. Uma das primeiras tentativas é descrita em [18]. Em [19] parte do espectro solar foi simulada por três cores de LED. Uma extensa pesquisa foi realizada na Universidade de Loughborough e é publicada em [20]-[22]. Em [10], uma lâmpada de halogênio é incluída como fonte de infravermelho em combinação com uma fonte de vários LEDs, obtendo bons resultados, embora nenhum controle

tenha sido feito. Os LEDs de alto brilho com sistema de controle de corrente foram utilizados por [23] em um emulador solar projetado para um intervalo de comprimento de onda de 400 nm a 1100 nm, alcançando boa uniformidade. No entanto, os simuladores solares presentes na literatura são todos projetados para reproduzir especificamente um único espectro da luz solar, portanto, não há flexibilidade no espectro emitido pelo sistema de iluminação.

Com base nessa problemática, este trabalho tem como objetivo projetar e desenvolver um sistema de iluminação que permita a emulação de espectro e intensidade de luz. Através de uma combinação apropriada de diferentes modelos de LED e controlando individualmente a potência de cada modelo de LED, é possível a reprodução de determinados espectros com fidelidade. Um procedimento de otimização é usado para dois propósitos: (a) escolher os modelos de LED mais apropriados que resultam em um espectro o mais próximo possível da referência; e (b), em caso de alteração no espectro de referência, para redefinir as condições de operação dos modelos de LED selecionados anteriormente que resultam no espectro com o menor erro em relação à referência atual.

Como contribuições deste trabalho, cita-se: (a) o uso de Programação Matemática, através de um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), o qual possibilita obter um SPD do sistema de iluminação com menor erro possível em relação ao SPD de referência dado os modelos de LEDs utilizados na solução e as limitações da aplicação; e (b) uma metodologia que possibilita obter um sistema de iluminação com flexibilidade no espectro da luz emitida, visto que, a partir dos LEDs utilizados no sistema, o modelo de PLIM encontrará combinações que resultam no menor erro possível para novas referências de espectro. Essa flexibilidade não é encontrada em outros trabalhos da literatura e é de particular interesse das principais aplicações que se preocupam com o espectro da luz. Por exemplo, para simuladores solares é possível reproduzir o espectro de diferentes horários do dia e diferentes localidades. Para o caso de aplicações em horticultura, é possível estimular respostas específicas das plantas conforme cada período de desenvolvimento destas ou analisar as diferentes respostas a partir de regiões específicas do espectro da luz.

Ressalta-se que a concepção e metodologia de projeto foram previamente apresentados de modo parcial em [24-25], entretanto, somente com a divulgação de resultados de simulação do espectro de iluminação da aplicação prática proposta. Neste trabalho, o desenvolvimento por completo do sistema é apresentado, incluindo resultados experimentais dos espectros obtidos através do sistema de iluminação desenvolvido para validação da metodologia. A metodologia de projeto, a eletrônica de potência necessária para acionar os LEDs e os resultados experimentais, tanto do sistema eletrônico quanto do sistema de iluminação, são discutidos em detalhes. A concepção e a metodologia de projeto são novamente apresentadas para possibilitar uma melhor compreensão por parte do leitor.

II. MÉTODO OTIMIZADO DE SELEÇÃO DOS LEDs

A primeira etapa do desenvolvimento foi criar um banco de dados com diferentes LEDs. Os modelos de LED incluídos no banco de dados dependem dos critérios definidos pelo projetista, por exemplo, espectro a ser reproduzido,

acessibilidade, custo, confiabilidade, desempenho, tamanho e outros. Cada curva SPD relativa do LED foi extraída da folha de dados e, para combinar diferentes LEDs para estimar o espectro resultante, cada curva espectral foi discretizada. No entanto, os fabricantes geralmente fornecem a curva SPD do LED em valores por unidade (p.u.), isto é, em quantidades sem dimensão. Assim, é necessário converter a curva espectral de quantidades adimensionais em quantidades físicas. A curva SPD pode ser convertida usando (1).

$$S = \frac{\varphi_r M}{A} \quad (1)$$

onde A representa a área da superfície de iluminação em m^2 , φ_r representa o fluxo relativo (p.u.) em um determinado comprimento de onda da curva relativa do SPD e M é um multiplicador apropriado necessário para converter uma intensidade relativa em um determinado comprimento de onda em uma intensidade quantificada, que é dado por (2).

$$S_x = \frac{\varphi_w}{\varphi_n} \quad (2)$$

onde φ_w representa o fluxo radiante total (W) de um LED e φ_n o fluxo relativo total (p.u.) encontrado como a área da curva relativa-SPD, isto é, parte integrante da curva SPD. Uma complicação adicional é que os fabricantes de LED geralmente fornecem o fluxo luminoso total φ_{lm} (lm) em vez do fluxo radiante total φ_w (W). Portanto, é necessário converter os valores fotométricos nos valores radiométricos correspondentes. O fluxo radiante pode ser calculado usando (3), que estabelece uma relação entre o fluxo luminoso φ_{lm} e o fluxo radiante φ_w através da curva fotópica e a máxima eficácia do olho humano [26],

$$\varphi_{lm} = 683 \int_{380}^{780} V(\lambda) \varphi_w(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

onde φ_{lm} representa o fluxo luminoso (lm), φ_w representa o fluxo radiante espectral (W/nm), $V(\lambda)$ representa a curva fotópica e 683 (lm/W) o valor da máxima eficácia possível do olho humano.

A partir do banco de dados do modelo de LED, um procedimento de otimização determina os modelos de LED mais adequados à situação e ajusta o número de LEDs de cada modelo até que o espectro desejado seja obtido com um erro mínimo. Uma suposição importante é que todo o fluxo radiante emitido pelos LEDs atinja a superfície de iluminação desejada. Neste trabalho, o problema de determinar o número ideal de LEDs de cada modelo que retorna o espectro mais preciso foi modelado como um problema de Programação Linear Inteira Mista. Os objetivos são: (a) minimizar o erro máximo entre o espectro projetado e o espectro de referência em um determinado comprimento de onda; e (b) minimizar o erro total em todos os comprimentos de onda, levando em consideração as restrições relacionadas ao número de diferentes LEDs; número de LEDs do mesmo modelo e a diferença entre o número de LEDs de modelos diferentes.

A Programação Inteira Mista é um método específico da Programação Matemática que combina variáveis que podem

assumir valores decimais com variáveis que assumem apenas valores inteiros. A notação usada na formulação é a seguinte:

Conjuntos

I é o conjunto de LEDs;

J é o conjunto de pontos do espectro de referência.

Parâmetros

UD é o limite superior do número de LEDs diferentes que podem estar na solução;

D_{ij} é o limite superior da diferença entre o número de quaisquer dois modelos de LEDs que podem estar na solução;

ε é o peso utilizado na ponderação da função objetivo;

UX_i é o limite superior do número de LEDs do modelo i ;

c_j são os pontos da curva de referência;

I_{ij} são os pontos da curva SPD de cada LED.

Variáveis

$d_i = \begin{cases} 1, & \text{se o LED está na solução} \\ 0, & \text{em outro caso} \end{cases}$

E_{max} é o maior erro entre todos comprimentos de onda;

e_j^+ é o erro positivo em um dado comprimento de onda;

e_j^- é o erro negativo em um dado comprimento de onda;

x_i é a aproximação do número de LEDs do modelo i na solução.

Modelo de Programação Linear Inteira Mista

$$\min \quad E_{max} + \varepsilon \sum_{j \in J} (e_j^+ + e_j^-) \quad (4)$$

Sujeito a

$$\sum_{i \in I, j \in J} I_{ij} x_i = c_j - e_j^+ + e_j^- \quad \forall j \in J \quad (5)$$

$$E_{max} \geq e_j^+ \quad \forall j \in J \quad (6)$$

$$E_{max} \geq e_j^- \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$x_i \leq d_i * UX_i \quad \forall i \in I \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} d_i \leq UD \quad (9)$$

$$x_i - x_j \leq D_{ij} \quad \forall (i, j) \in I \times I : i \neq j \quad (10)$$

$$-x_i + x_j \leq D_{ij} \quad \forall (i, j) \in I \times I : i \neq j \quad (11)$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (12)$$

$$d_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (13)$$

$$E_{max} \geq 0 \quad (14)$$

$$e_j^+, e_j^- \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (15)$$

A função objetivo do modelo é determinada em (4), a qual minimiza o erro máximo em um determinado comprimento de onda e o erro total de todos os outros comprimentos de onda presentes no problema. Ele emprega o peso ε para fornecer uma importância relativa entre as partes da função objetivo, em outras palavras, para definir uma hierarquia. De acordo com a restrição (5), o produto da intensidade radiante de um determinado modelo de LED em um determinado comprimento de onda, I_{ij} , pelo número de LEDs desse modelo, x_i , deve ser igual à intensidade do espectro de

referência nesse ponto, c_j , mais um erro. As restrições (6) e (7) definem o erro máximo que aparece na solução. A restrição (8) limita o número máximo de LEDs do mesmo modelo. Observe que d_i é um binário, portanto será apenas um se um determinado modelo de LED aparecer na solução. O número máximo de modelos de LED é limitado pela restrição (9). As restrições (10) e (11) determinam a diferença máxima no número de LEDs entre quaisquer dois modelos que estão na solução. As restrições (12-15) definem o domínio das variáveis.

III. APLICAÇÃO PRÁTICA

Neste trabalho, como aplicação prática da metodologia apresentada anteriormente, um sistema de iluminação LED é projetado para reproduzir o espectro de luz do sol em diferentes momentos do dia. Reproduzir o espectro da luz natural é uma tarefa bastante difícil e um sistema com essa característica é de interesse para aplicações como testes em painéis fotovoltaicos, horticultura e estudos envolvendo fisiologia vegetal ou ciclo circadiano. Simuladores solares já foram relatados para aplicação na caracterização de painéis fotovoltaicos [23], [27]-[29]. No entanto, eles são projetados para reproduzir apenas um espectro de referência definido por padrão. Com o simulador de luz flexível, é possível reproduzir os espectros da luz solar para diferentes locais, diferentes condições solares e diferentes horas do dia. Por exemplo, a Figura 3 mostra o SPD da luz do dia para diferentes horas do dia obtidas para a coordenada geográfica (29°42'19,8" S, 53° 42'56,5" O), através do *software* Solar Spectrum Calculator da PV Lighthouse.

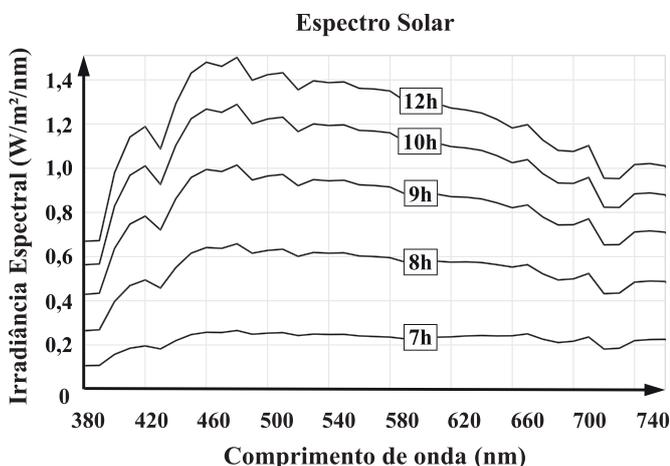


Fig 3. Espectro solar ao nível do solo para diferentes momentos do dia.

Nesta aplicação, o espectro solar do meio-dia é usado como referência de projeto. Uma vez que o espectro desse horário possui a intensidade mais alta, o sistema terá capacidade para reprodução do espectro de outros horários. A escolha dos LEDs foi feita com base na metodologia apresentada anteriormente. Diferentes combinações de LEDs foram simuladas através do procedimento de otimização, visando atingir a correspondência espectral mais adequada que apresentava o menor erro. O coeficiente de peso ϵ foi definido como 0,1. Este foi ajustado pequeno o suficiente para não interferir nos resultados máximos de erro. O número máximo de diferentes modelos de LED, representado pelo

parâmetro UD , foi definido em sete. Experiências empíricas mostraram que valores maiores que sete não afetariam o erro máximo E_{max} e apenas diminuiriam ligeiramente a soma dos erros. Além disso, mais modelos de LED levam a um número maior de conversores de potência, o que resulta em aumento de custo e tamanho. A diferença máxima entre dois modelos de LED na solução, representada pelo parâmetro D_{ij} , foi definida em quatro, embora a simulação tenha resultado em uma solução com uma diferença máxima de três LEDs entre quaisquer dois modelos de LED. O parâmetro UX_i , que limita o número máximo de LEDs do mesmo modelo, foi definido alto o suficiente para não interferir na solução, uma vez que o parâmetro D_{ij} já limita o número de LEDs de um determinado modelo com base no número de LEDs dos outros modelos.

Para os testes usando procedimentos de programação matemática, o *software* CPLEX [30] com configurações padrões foi usado em um computador executando Windows 8 com Intel Core i5, 3,2 GHz e 4 GB de RAM.

A. Seleção dos LEDs

O sistema de iluminação proposto consiste em um grupo de conjuntos de LEDs de 15 cm por 15 cm (225 cm²). Os LEDs são posicionados em uma geometria estratégica para minimizar a não uniformidade espacial. A Tabela I especifica os modelos de LED compõem cada conjunto com sua respectiva corrente nominal I_n . O coeficiente x representa o número estimado de LEDs operando na potência nominal obtido através do procedimento de otimização. O número real de LEDs é obtido arredondando esse coeficiente e, através da relação fluxo-corrente disponível na folha de dados dos LEDs, a corrente de cada LED é calculada em termos de porcentagem da corrente nominal I_n de cada LED. A Figura 4 mostra o espectro teórico obtido a partir da metodologia apresentada em comparação com o espectro do meio-dia. O procedimento de otimização resultou em uma solução com um erro relativo médio de 12% entre o espectro de referência e o espectro projetado, um erro relativo mínimo de 0,012% no comprimento de onda de 472 nm e um erro relativo máximo de 56% no comprimento de onda de 690 nm. Com relação ao erro relativo máximo, destaca-se que a região do espectro eletromagnético na qual ele ocorre está próxima do limiar entre a luz visível e a não visível e os LEDs que operam nessa região são muito difíceis de encontrar, além de, geralmente, possuírem um custo elevado.

O erro entre o espectro de referência e o projetado ocorre devido à indisponibilidade de LEDs no banco de dados que emitem fluxo radiante em comprimentos de onda específicos. À medida que o número de modelos de LED no banco de dados aumenta, a metodologia de otimização é capaz de encontrar soluções com erros menores. Os modelos de LED inclusos no banco de dados dependem dos critérios definidos pelo projetista. Na aplicação prática deste trabalho (espectro da luz solar), o banco de dados de LEDs foi criado levando em consideração critérios como confiabilidade, desempenho e disponibilidade para a compra dos LEDs.

TABELA I
Coefficiente de Peso x e Porcentagem da Corrente
Nominal dos LEDs I_n

LED	x	Número de LEDs	I_n (mA)	$\%I_n$
Luxeon Rebel LXML-PWN2 (Branco-neutro)	6	7	700	85
XPEWHT-II-0000-00BE7 (Branco-quente)	5,66	5	350	94
Luxeon Rebel LXML-PE01 (Ciano)	4,5	7	350	90
LH W5AM-2T3T-1 (Vermelho)	2,25	4	800	75
XPEFAR-L1-0000-0070 (Vermelho-distante)	4,5	5	350	90
XPEBLU-L1-0000-00201 (Azul)	3,5	3	350	87
SML-LXL8047UVC (UV)	2,1	3	700	70

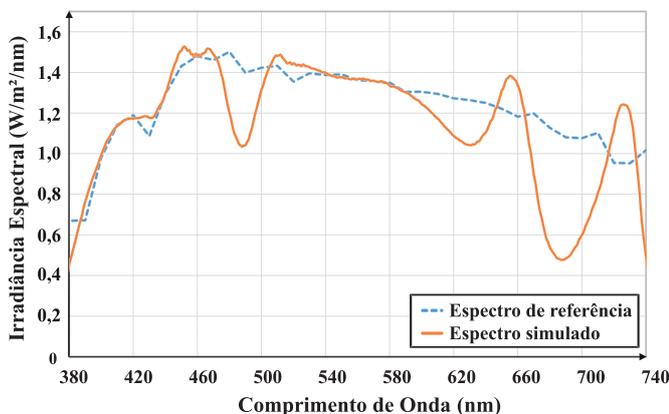


Fig 4. Espectro teórico otimizado *versus* espectro solar ao meio-dia.

B. Especificação do Driver de LED

O fluxo dos LEDs depende diretamente de sua corrente direta e, como não são capazes de regular sua própria corrente, eles exigem um circuito de acionamento regulador de corrente, conhecido por *driver*. Os LEDs também são cargas de corrente contínua (c.c.), portanto, é necessário um circuito retificador ao existir conexão com a tensão da rede. Além da retificação, a correção do fator de potência (CFP) é necessária quando exigida por padrões como IEC 61000-3-2 [31]. [A norma IEC 61000-3-2 limita a quantidade máxima de conteúdo harmônico na corrente de entrada do equipamento, permitindo assim uma distorção máxima na corrente de entrada]. Para contemplar todos os requisitos, diferentes topologias foram propostas pela literatura. Tradicionalmente, os *drivers* de LED são baseados em topologias de estágio único ou dois estágios. O *driver* de LED de estágio único é um conversor de corrente alternada para corrente contínua (c.a./c.c.) com corrente de saída constante e CFP. Essas topologias têm apenas um estágio de conversão de energia e geralmente têm uma baixa contagem de componentes. Embora, com apenas um estágio, muitas vezes seja difícil garantir um bom desempenho em todos os aspectos [32]-[35]. O *driver* de LED de dois estágios compreende dois estágios de conversão de energia. O *driver* consiste em um conversor c.a./c.c., responsável pelo CFP, e um conversor c.c./c.c., responsável pela regulação da corrente de saída. Dessa forma, cada conversor é responsável por uma tarefa, para que o *driver* possa oferecer melhor desempenho do que a configuração de estágio único. No entanto, são necessários mais dispositivos, o que resulta em aumento de custo e

tamanho [36]-[39]. As diferentes configurações de *driver* de LED estão bem descritas na literatura e informações detalhadas podem ser encontradas em [40]-[43].

Nesta aplicação prática, existem sete modelos de LED diferentes, sendo os LEDs do mesmo modelo agrupados em série, formando ramos. Além disso, o controle independente de cada grupo de LEDs é essencial para a reprodução de diferentes espectros. Em um primeiro momento, prioriza-se o desempenho e a flexibilidade do sistema eletrônico, não sendo um objetivo otimizar características como custo, tamanho e eficiência. Dessa maneira, uma topologia de dois estágios independentes é uma opção interessante. Nessa configuração, o primeiro estágio consiste em um conversor c.a./c.c., responsável pela correção do fator de potência e por fornecer uma tensão de barramento regulada (V_{BUS}) ao segundo estágio. No segundo estágio, cada ramo de LED é acionado por um conversor c.c./c.c.. Nesse caso, sete conversores são utilizados no segundo estágio. Cada conversor deve ser capaz de manter a corrente dos LEDs regulada com precisão e fornecer controle independente da intensidade luminosa. Como o desenvolvimento do sistema eletrônico não é o foco principal deste trabalho, apenas o desenvolvimento do segundo estágio do *driver* é implementado, sendo o primeiro estágio substituído por uma fonte c.a./c.c..

O segundo estágio deve consistir em conversores abaixadores. O conversor Buck é uma escolha interessante, uma vez que sua configuração como fonte de corrente o torna atraente para acionar LEDs - além de ser simples, robusto, eficiente, de baixo custo e confiável. Cada *driver* é projetado para fornecer uma corrente com controle preciso para os LEDs. Dessa forma, cada grupo de LEDs do mesmo comprimento de onda é controlado de forma independente, a fim de obter flexibilidade no espectro de saída desejado, permitindo a emulação de uma variedade de espectros diferentes. Um microcontrolador é usado para gerar sinais de modulação por largura de pulso (PWM - do inglês *Pulse Width Modulation*) para o sistema de controle de intensidade luminosa do segundo estágio dos *drivers* de LED e, assim, emular ativamente diferentes espectros.

A Figura 5 mostra o conversor Buck usado para acionamento dos LEDs. O interruptor S_2 colocado em paralelo aos LEDs é utilizado para desviar a corrente de saída do conversor dos LEDs, proporcionando assim um controle de intensidade luminosa por PWM de alta velocidade. O PWM é empregado para fins de controle de intensidade luminosa para minimizar o desvio de cromaticidade [44] e proporcionar um controle de intensidade luminosa linear. A frequência do PWM foi ajustada em 25 kHz para evitar ruídos audíveis [45]. A corrente média dos LEDs é dada por (16).

$$I_{LED} = (1 - D_{dim}) \cdot I_L \quad (16)$$

onde D_{dim} é a razão cíclica do interruptor S_2 e I_L é a corrente média do indutor. Os sinais PWM são definidos com base nas referências de corrente calculadas na metodologia anterior para cada ramo de LEDs para emular um espectro específico. O interruptor principal S_1 é utilizado para controlar a corrente do indutor e manter seu valor médio igual à corrente nominal do LED, para que o controle de intensidade luminosa por PWM ajuste a corrente dos LEDs em zero ou em seu valor nominal. Uma estratégia de controle histerético é usada para

manter a corrente do indutor regulada em seu valor médio. Esta estratégia é utilizada para que o sistema de controle de intensidade luminosa não interfira no controle do conversor, uma vez que a corrente no indutor permanece constante entre os limites do controle histerético quando o interruptor S_2 está no modo de condução.

Além disso, o conversor Buck é projetado sem capacitor de saída. Portanto, a impedância de saída do conversor aumenta significativamente e o conversor é capaz de alterar a tensão de saída mais rapidamente para manter constante a corrente de saída, isto é, o conversor se comporta substancialmente como uma fonte de corrente. Portanto, a frequência do controle de intensidade luminosa pode ser aumentada e, uma vez que não há capacitor de saída, os atrasos na subida e descida da corrente do LED dependem apenas dos tempos de subida e descida do dispositivo de desvio da corrente. Uma vez que o controle histerético mantém a corrente do indutor entre dois limites positivos, o conversor opera no modo de condução contínua (CCM – do inglês *Continuous Conduction Mode*).

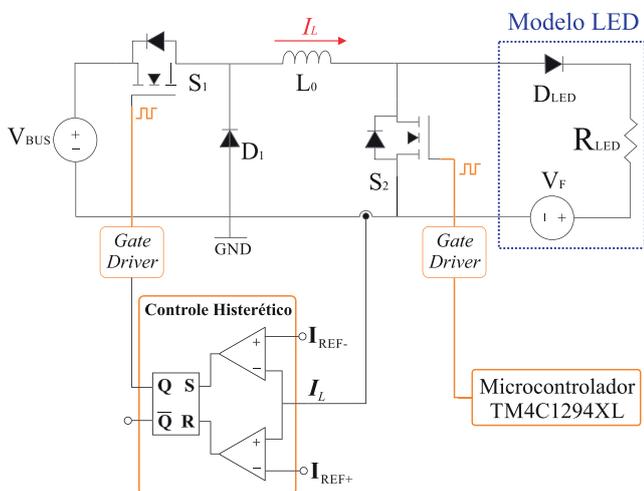


Fig 5. Conversor Buck com controle de intensidade luminosa por PWM.

A Figura 6 apresenta um esquemático simplificado do sistema eletrônico, em que G_{S_1} representa o sinal PWM do controle histerético para o interruptor S_1 de cada conversor Buck, enquanto G_{S_2} representa o sinal PWM do controle de intensidade luminosa para o interruptor S_2 de cada conversor.

A Figura 7 mostra o sistema de *driver* de LED implementado. O sistema do *driver* consiste em um microcontrolador Texas Instruments TM4C1294XL e sete conversores Buck dispostos em uma placa de circuito impresso de 27,5 cm por 19 cm.

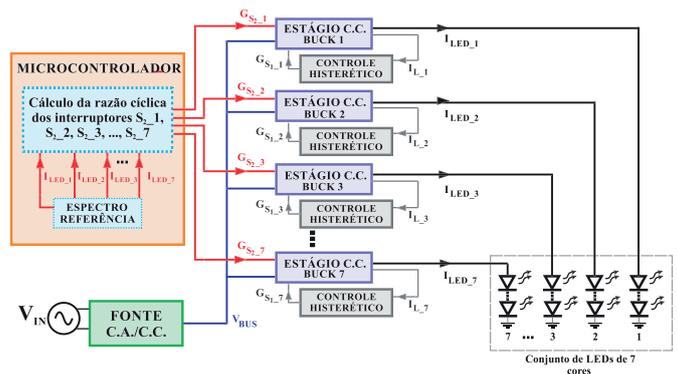


Fig 6. Esquemático simplificado do sistema eletrônico.

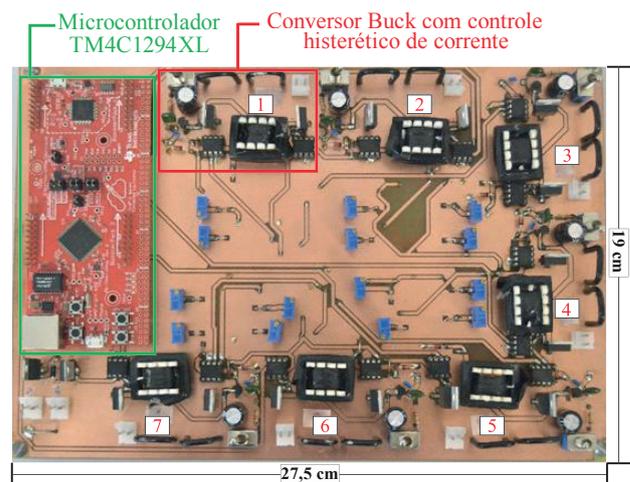


Fig 7. Sistema de *driver* de LED implementado.

Cada conversor Buck é projetado de acordo com o conjunto de LEDs ao qual operará como fonte de energia. A tensão de saída de cada *driver* de LED depende do número de LEDs em cada conjunto. Os valores para a tensão de saída dos conversores estão entre 12V e 20V. A potência do módulo é de 50 W e a tensão de entrada (V_{BUS}) foi fixada em 40 V. A frequência de comutação f_s do interruptor S_1 do conversor não é fixa, em virtude de o controle por histerese atuar sob a ondulação de corrente do indutor. Entretanto, o indutor é projetado para que a frequência de comutação fique em torno de 70 kHz. As referências superior e inferior do controle histerético (I_{REF+} e I_{REF-}) foram definidas para resultar em um fator de ondulação (ΔI_L) de 20% na corrente do indutor e, consequentemente, na corrente dos LEDs. De acordo com [46], um fator de ondulação de 20% não afeta o desempenho fotométrico dos LEDs. Dessa maneira, cada indutância do conversor Buck é dada por (17) [47]:

$$L = \frac{V_0 (1 - D)}{\Delta I_L f_s} \quad (17)$$

onde V_0 é a tensão da cadeia de LEDs, D é o ciclo de trabalho do conversor, ou seja, V_0/V_{BUS} , ΔI_L é o fator de ondulação da corrente no indutor e f_s é a frequência de comutação do interruptor S_1 .

TABELA II
Especificações de Cada Conjunto de LEDs

LED	Número de LEDs	I_n (mA)	Tensão nominal do LED (V)	Tensão no ramo (V)	Indutância do Buck (mH)	Componente
Luxeon Rebel LXML-PWN2 (Branco-neutro)	7	700	3,1	21,7	1,0	EE 30/15/14, AWG 23
XPEWHT-I1-0000-00BE7 (Branco-quente)	5	350	3,2	22,4	2,0	EE 30/15/14, AWG 23
Luxeon Rebel LXML-PE01 (Ciano)	7	350	2,9	14,5	1,9	EE 30/15/14, AWG 23
LH W5AM-2T3T-1 (Vermelho)	4	800	2,15	6,45	1,2	EE 30/15/14, AWG 23
XPEFAR-L1-0000-0070 (Vermelho-distante)	5	350	1,9	9,5	1,5	EE 30/15/14, AWG 23
XPEBLU-L1-0000-00201 (Azul)	3	350	3,2	12,8	1,8	EE 30/15/14, AWG 23
SML-LXL8047UVC (UV)	3	700	3,8	11,4	1,0	EE 30/15/14, AWG 23

Componentes de Cada Conversor Buck do Protótipo

Descrição	Componente
Interruputor de potência	MOSFET Infineon IRF540N
Interruputor do controle de intensidade luminosa	MOSFET Infineon IRF540N
Diodo de potência	Fairchild SSA210
Sensor de corrente	Texas Instruments INA193
Gate driver do interruputor S_1	International Rectifier IR2117
Gate driver do interruputor S_2	International Rectifier IR4427

O controle histerético foi implementado com o uso de dois circuitos integrados. O Texas Instruments LM339, consistindo em comparadores, foi usado para comparar as referências de corrente superior e inferior com a corrente medida do indutor. O Intersil CD4043 foi utilizado para implementar o *latch* Set-Reset (SR), responsável pelos sinais ON/OFF do interruputor do conversor Buck. A especificação de cada conjunto de LEDs, a indutância do conversor correspondente e os outros componentes de cada protótipo do conversor Buck são apresentados na Tabela II.

Da Figura 8 a Figura 10 são apresentados alguns resultados experimentais para um dos *drivers* de LED, nos quais a corrente nominal do ramo de LEDs é de 350 mA. A Figura 8 mostra as formas de onda da corrente dos LEDs i_{LED} para 35% de razão cíclica do interruputor S_2 , responsável pelo controle de intensidade luminosa. A corrente medida no ramo dos LEDs é quase 220 mA. Através das formas de onda das tensões nos interruptores S_1 e S_2 é possível confirmar a frequência de comutação de 70 kHz e a frequência de controle de intensidade luminosa de 25 kHz. A Figura 9 mostra o comportamento das correntes através do indutor i_L e do interruputor S_1 , bem como as tensões nos interruptores S_1 e S_2 para a operação de controle de intensidade luminosa em 35%. Na Figura 10, é mostrada a operação do controle histerético. A tensão do sensor v_{sensor} usada para medir a corrente do indutor permanece entre os limites superior e inferior. Além disso, a forma de onda da saída de tensão do sensor mostra que, quando o interruputor de controle de intensidade luminosa, em paralelo ao ramo de LEDs, é acionado, o conversor permanece desligado e a corrente do indutor permanece no diodo de roda livre.

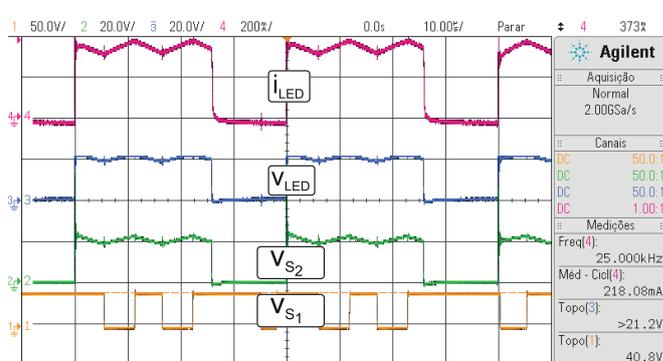


Fig 8. Tensão no interruputor S_1 (CH1 – 50 V/div), corrente nos LEDs (CH4 – 200 mA/div), tensão no interruputor S_2 (CH2 – 20 V/div) e tensão nos LEDs (CH3 – 20 V/div) para uma razão cíclica de controle de intensidade luminosa de 35%.

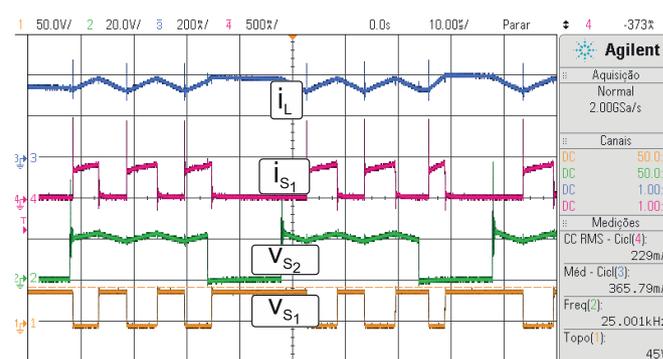


Fig 9. Corrente no indutor (CH3 – 200 mA/div), corrente no interruputor S_1 (CH4 – 500 mA/div), tensão no interruputor S_2 (CH2 – 20 V/div) e tensão no interruputor S_1 (CH1 – 50 V/div).

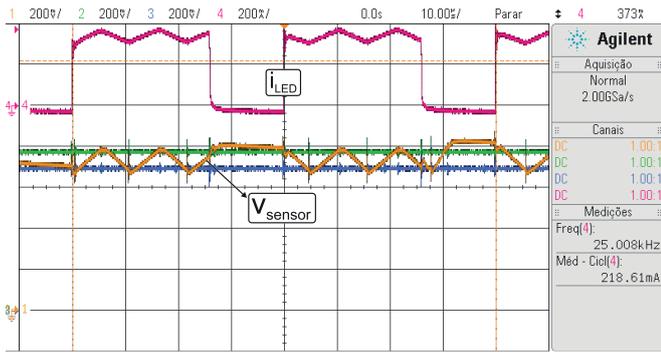


Fig 10. Corrente nos LEDs (CH4 – 200 mA/div), tensão no sensor (CH1 – 200 mV/div) e tensão dos limites superior (CH2) e inferior (CH3) do controle histerético para uma razão cíclica do controle de intensidade luminosa de 35%.

C. Resultados Experimentais

O módulo de LEDs de 15 cm por 15 cm do simulador de luz consiste em 33 LEDs de alta potência montados em um dissipador de calor, conforme mostrado na Figura 11.a. Para avaliar o desempenho do sistema de iluminação, foram realizadas medições de luz em uma esfera integradora Inventfine de 150 cm. Os LEDs foram alimentados pelo *driver* desenvolvido, no qual a corrente de cada ramo foi ajustada em um valor de referência para a reprodução do espectro solar do meio-dia. O uso da esfera integradora viabiliza a suposição de que toda a luz atinge a superfície de iluminação. A Figura 11.b mostra o sistema eletrônico completo desenvolvido em operação, a Figura 11.c mostra a configuração do sistema experimental e a Figura 11.d mostra a bancada de trabalho experimental.

No entanto, após um primeiro teste, as medidas do espectro apresentaram um erro além do esperado, não apenas em relação ao espectro solar do meio-dia, usado como referência de projeto, mas também em relação ao próprio espectro projetado. Dessa forma, foram realizadas medições individuais de cada modelo de LED, a fim de compará-lo com o espectro disponível na folha de dados e obter o

comportamento espectral exato de cada modelo de LED. Para realizar as medições individuais, foi utilizada a esfera integradora, na qual cada ramo de LEDs do mesmo modelo foi acionado ao mesmo tempo. Cada medida foi dividida pelo número de LEDs do respectivo ramo, obtendo assim o comportamento médio do modelo de LED. Como pode ser visto na Figura 12, as medições individuais mostraram que a diferença era mais significativa para o LED UV. Além disso, nos dois tipos de LEDs brancos presentes na solução, os picos de intensidade na região azul (comprimentos de onda próximos à 450 nm) são deslocados em comparação com o espectro da folha de dados, resultando em uma soma de intensidades diferentes da projetada. São esperadas diferenças na distribuição espectral, uma vez que os próprios fabricantes relatam que há uma diferença entre os espectros de amostras do mesmo modelo, especialmente em LEDs que usam camadas de fósforo para converter luz, como os LEDs brancos. Além disso, diferenças também podem ocorrer porque a esfera integradora utilizada neste estudo é diferente da utilizada pelo fabricante.

Com base nas medições individuais dos LEDs, o procedimento de otimização foi realizado novamente. No momento, não se pretendia mais obter uma seleção de LEDs, mas redefinir as condições operacionais de cada modelo do módulo que resultariam em um erro mínimo. A Tabela III mostra, para cada modelo de LED, o número de LEDs presentes no módulo, o coeficiente x obtido através do procedimento de otimização, a porcentagem do fluxo radiante nominal do LED φ e a corrente do ramo de LED I_{LED} necessária para a reprodução do espectro solar do meio-dia.

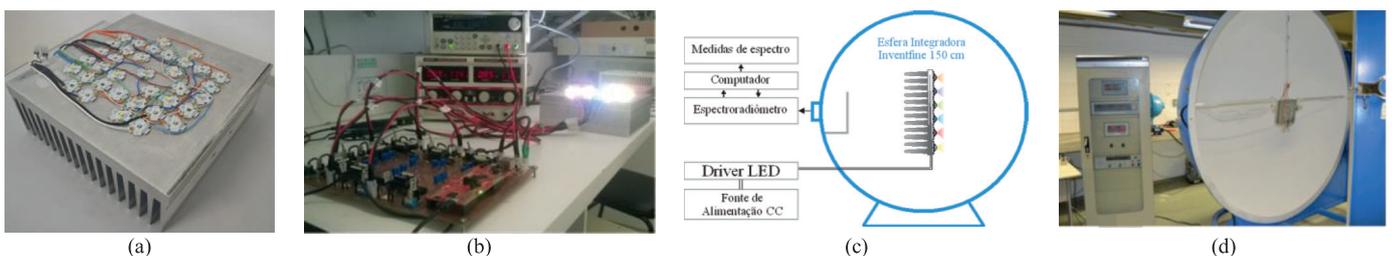


Fig 11. (a) Protótipo desenvolvido do módulo de LEDs, (b) sistema eletrônico desenvolvido em operação, (c) esquema da plataforma de testes e (d) bancada de trabalho experimental com o módulo de LEDs na esfera integradora Inventfine de 150 cm.

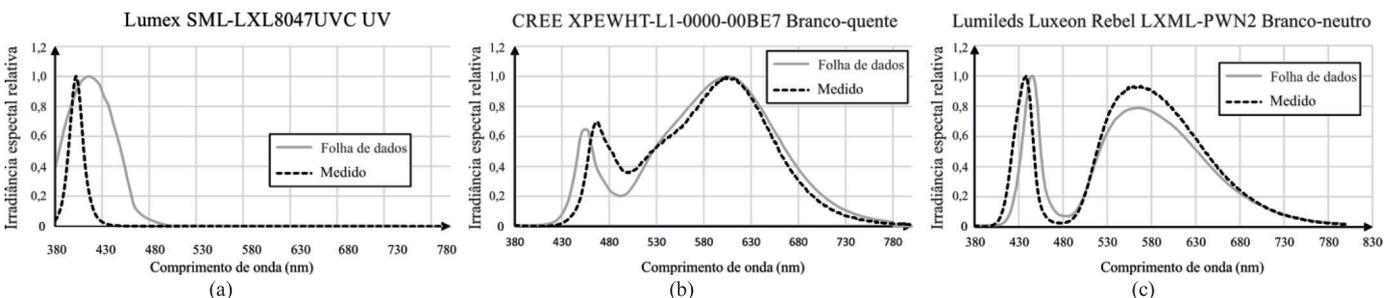


Fig 12. Comparação entre o espectro presente na folha de dados e o espectro medido para os modelos de LED (a) UV, (b) branco quente e (c) branco neutro.

TABELA III
Coefficiente de Peso x e Corrente dos LEDs I_{LED} Para
Reprodução do Espectro da Luz Solar do Meio Dia

LED	x	Número de LEDs	$\% \phi$	I_{LED} (mA)
Luxeon Rebel LXML-PWN2 (Branco-neutro)	6	7	85	570
XPEWHT-I1-0000-00BE7 (Branco-quente)	4,5	5	90	290
Luxeon Rebel LXML-PE01 (Ciano)	5,7	7	64	205
LH W5AM-2T3T-1 (Vermelho)	3,5	4	87	280
XPEFAR-L1-0000-0070 (Vermelho-distante)	4,5	5	90	320
XPEBLU-L1-0000-00201 (Azul)	2	3	66	500
SML-LXL8047UVC (UV)	2,3	3	75	250

Na Figura 13, o espectro medido é comparado com o espectro solar do meio-dia. Os resultados mostram boa consistência com o espectro projetado, com um erro relativo médio de 20% entre o espectro de referência e o espectro medido, um erro relativo mínimo de 0,12% no comprimento de onda de 608 nm e um erro relativo máximo de 89% no comprimento de onda de 380 nm. Um erro maior é esperado nos comprimentos de onda menores (regiões do UV e azul), em virtude da diferença entre o espectro presente na folha de dados dos LEDs e o espectro medido, conforme verificado nas medições individuais apresentadas anteriormente.

A Figura 14 mostra o espectro projetado, obtido a partir do procedimento de otimização com dados das medições individuais, em comparação com o espectro medido. Além disso, a figura mostra o erro percentual relativo entre as curvas espectrais em cada comprimento de onda. O erro relativo médio é de 5%, o erro relativo mínimo é de 0,003% no comprimento de onda de 623 nm e o erro relativo máximo é de 12% no comprimento de onda de 470 nm. O erro entre o espectro projetado e o espectro medido depende, basicamente, da precisão com que o sistema eletrônico consegue reproduzir a corrente calculada para cada grupo de LEDs e da performance da esfera integradora, visto que o revestimento interno da esfera não é 100% reflexivo, ocorrendo perdas especialmente na região de comprimentos de onda menores (regiões do UV e azul).

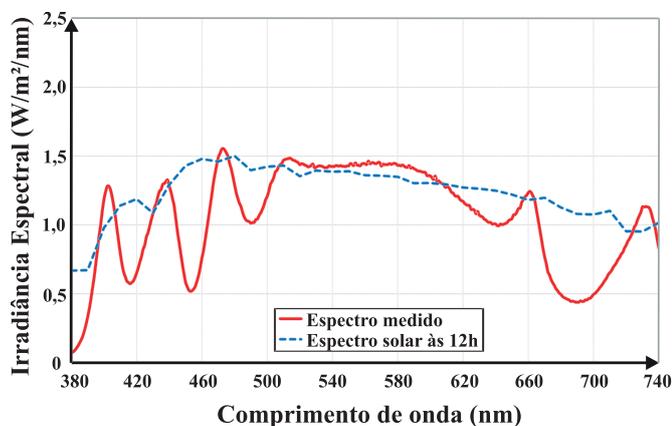


Fig 13. Espectro medido em comparação ao espectro solar do meio-dia.

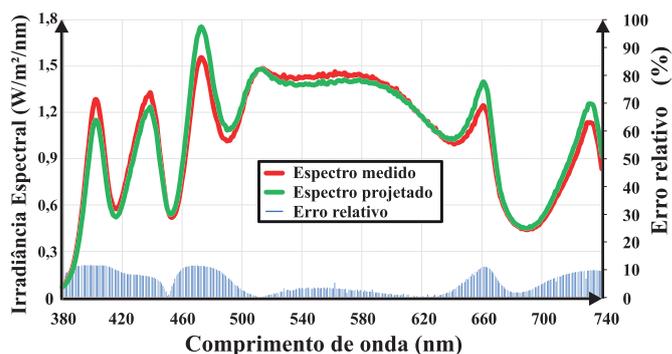


Fig 14. Comparação entre o espectro projetado e medido e o erro relativo percentual em cada comprimento de onda.

Uma das vantagens do simulador de luz é sua capacidade de alterar o espectro da luz emitida. Como exemplo de aplicação, o procedimento de otimização foi usado para determinar as condições de operação dos diferentes modelos de LED no módulo que seriam necessárias para reproduzir o espectro da luz solar das nove e das oito horas da manhã. Uma vez que o módulo foi projetado tendo como referência o espectro do meio-dia, horário de maior irradiância, o procedimento de otimização encontrará um coeficiente x menor para cada modelo de LED para reprodução do espectro de outros horários. Como o número de componentes de cada modelo de LED está fixo no módulo, são necessárias porcentagens menores da corrente nominal de cada modelo de LED para a reprodução de espectros de luz solar menos intensos que o do meio-dia, ou seja, a corrente I_{LED} de cada ramo será menor em relação aos valores para reprodução do espectro do meio-dia, conforme pode ser verificado na Tabela IV e na Tabela V. A Tabela IV mostra as condições operacionais de cada modelo de LED para reproduzir o espectro da luz solar das 9h.

TABELA IV
Coefficiente de Peso x e Corrente dos LEDs I_{LED} Para
Reprodução do Espectro da Luz Solar das 9h

LED	x	Número de LEDs	$\% \phi$	I_{LED} (mA)
Luxeon Rebel LXML-PWN2 (Branco-neutro)	4	7	57	365
XPEWHT-I1-0000-00BE7 (Branco-quente)	3	5	60	200
Luxeon Rebel LXML-PE01 (Ciano)	4	7	60	210
LH W5AM-2T3T-1 (Vermelho)	2,6	4	65	200
XPEFAR-L1-0000-0070 (Vermelho-distante)	3,1	5	62	220
XPEBLU-L1-0000-00201 (Azul)	0,6	3	20	180
SML-LXL8047UVC (UV)	0,9	3	30	115

A Figura 15 mostra o espectro medido em comparação ao espectro de referência da luz solar a partir das 9h. O espectro medido possui boa similaridade com o espectro de referência, sendo o erro relativo médio de 19%, o erro relativo mínimo de 0,01% no comprimento de onda de 520 nm e o erro relativo máximo de 89% no comprimento de onda de 380 nm.

IV. CONCLUSÕES

Neste artigo, um simulador de luz baseado em diodos emissores de luz foi projetado e testado. Uma metodologia de otimização foi desenvolvida para definir os LEDs que melhor se ajustariam à referência. O problema em definir os modelos de LED e a quantidade de componentes de cada modelo que resultariam em erro mínimo foi modelado como um problema de Programação Linear Inteira Mista. Essa metodologia também foi capaz de definir as condições de operação dos LEDs já existentes em um módulo para a reprodução de outros espectros de referência com menor erro possível. Destaca-se que a metodologia de otimização e a flexibilidade obtida pelo sistema de iluminação são os principais diferenciais em relação aos simuladores de luz descritos na literatura.

Como estudo de caso, a metodologia foi aplicada para projetar um módulo de 15 cm por 15 cm para reproduzir o espectro da luz do dia. O espectro do meio-dia foi utilizado como referência para definir a combinação de LEDs que resultaria na melhor aproximação. A partir dessa combinação, o procedimento de otimização também foi utilizado para definir as condições de operação dos LEDs para a reprodução do espectro solar de outros horários. Para este estudo de caso, o sistema de otimização foi capaz de encontrar uma solução com um erro relativo médio de 12%, mínimo de 0,012% no comprimento de onda de 472 nm e máximo de 56% no comprimento de onda de 690 nm entre os espectros de projeto e referência dado os modelos disponíveis no banco de dados de LEDs. Os modelos de LEDs são inclusos no banco de dados seguindo critérios definidos pelo projetista do sistema de iluminação, como custo, disponibilidade, confiabilidade, potência, dimensões, entre outros. Assim, conforme os critérios definidos pelo projetista, o espectro obtido terá maior ou menor erro em relação ao espectro de referência.

Os resultados experimentais mostraram que o sistema foi capaz de reproduzir o espectro de referência com boa similaridade, com um erro relativo médio de 20% em relação ao espectro de referência da luz solar ao meio-dia. O aumento no erro ocorreu devido às diferenças do espectro informado pelos fabricantes nas folhas de dados dos dispositivos e o espectro obtido para cada modelo através de medições individuais. Ademais, o procedimento de otimização foi capaz de redefinir as condições de operação do módulo para a reprodução do espectro da luz solar de outros horários, mantendo os percentuais de erro e, assim, evidenciando o potencial de uso da metodologia proposta para aplicações que necessitem um sistema de iluminação com espectro específico e, ainda mais, para aplicações que necessitem flexibilidade no espectro reproduzido.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001.

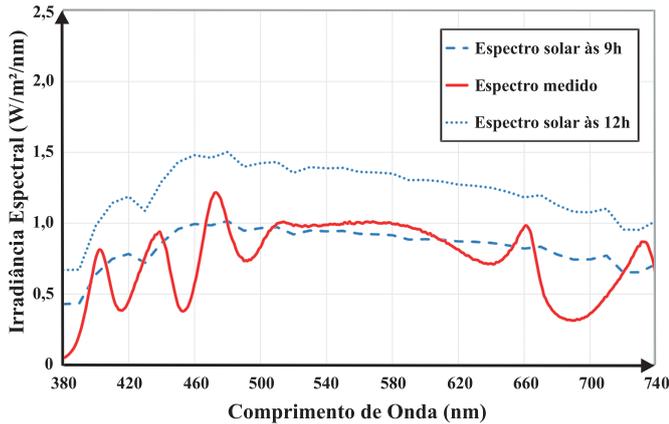


Fig 15. Espectro medido em comparação ao espectro solar das 9h.

O mesmo procedimento foi realizado com base no espectro da luz solar às 8h. A Tabela V mostra as condições operacionais definidas pelo procedimento de otimização e a Figura 16 mostra o espectro medido em comparação com o espectro de referência da luz solar das 8h. O erro relativo médio é de 18% entre o espectro de referência e o espectro medido, o erro relativo mínimo é de 0,17% no comprimento de onda de 506 nm e o erro relativo máximo é de 87% no comprimento de onda de 380 nm, mantendo o padrão dos casos anteriores.

TABELA V
Coefficiente de Peso x e Corrente dos LEDs I_{LED} Para Reprodução do Espectro da Luz Solar das 8h

LED	x	Número de LEDs	$\% \phi$	I_{LED} (mA)
Luxeon Rebel LXML-PWN2 (Branco-neutro)	2,7	7	38	240
XPEWHT-I1-0000-00BE7 (Branco-quente)	2	5	40	90
Luxeon Rebel LXML-PE01 (Ciano)	2,7	7	38	120
LH W5AM-2T3T-1 (Vermelho)	1,7	4	42	120
XPEFAR-L1-0000-0070 (Vermelho-distante)	2,1	5	42	150
XPEBLU-L1-0000-00201 (Azul)	0,4	3	13	110
SML-LXL8047UVC (UV)	0,7	3	23	75

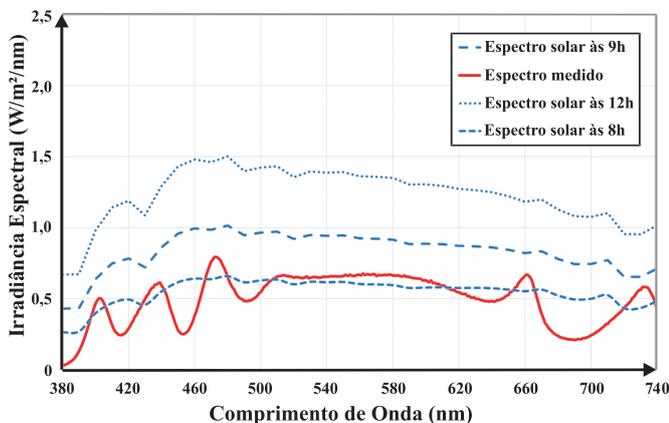


Fig 16. Espectro medido em comparação com o espectro solar das 8h.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Cole e T. Driscoll, "The Lighting Revolution: If We Were Experts Before, We're Novices Now," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 2, pp. 1509–1520, Mar. 2014.
- [2] M. Cole, H. Clayton, e K. Martin, "Solid-State Lighting: The New Normal in Lighting," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 1, pp. 109–119, Jan. 2015.
- [3] P. S. Almeida, H. A. C. Braga, M. A. Dalla Costa, e J. M. Alonso, "Offline Soft-Switched LED Driver Based on an Integrated Bridgeless Boost-Asymmetrical Half-Bridge Converter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 1, pp. 761–769, Jan. 2015.
- [4] J. Choi, H.-S. Han, e K. Lee, "A Current-Sourced LED Driver Compatible With Fluorescent Lamp Ballasts," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 8, pp. 4455–4466, Ago. 2015.
- [5] A. K. Jha e B. Singh, "A PFC Modified Landsman Converter-Based PWM-Dimmable RGB HB-LED Driver for Large Area Projection Applications," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 2, pp. 1552–1561, Mar. 2017.
- [6] R. Loisel, J. Butler, G. Brady, M. Walton, e N. Henze, "LED Lighting for Oil and Gas Facilities," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 2, pp. 1369–1374, Mar. 2015.
- [7] J. Y. Tsao *et al.*, "Toward Smart and Ultra-efficient Solid-State Lighting," *Adv. Opt. Mater.*, vol. 2, no. 9, pp. 809–836, Set. 2014.
- [8] P. Pinho, O. Moiso, E. Tetri, e L. Halonen, "Photobiological Aspects of Crop Plants Grown under Light Emitting Diodes," CIE Central Bureau, 2004, p. 71–74 BT-CIE Expert Symposium on LED Light Sour.
- [9] C. A. Mitchell *et al.*, "LEDs: The Future of Greenhouse Lighting!," *Chron. Horticul.*, vol. 52, no. 1, p. 9, 2012.
- [10] G. Grandi, A. Ienina, e M. Bardhi, "Effective Low-Cost Hybrid LED-Halogen Solar Simulator," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 5, pp. 3055–3064, Set. 2014.
- [11] J. Bohar, G. E. Fernandes, e J. Xu, "Spectral-Temporal LED Lighting Modules for Reproducing Daily and Seasonal Solar Circadian Rhythmicities," em *2017 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*, pp. 1–6, 2017.
- [12] M. Bennett e R. Podlesny, "Two source simulator for improved solar simulation," em *IEEE Conference on Photovoltaic Specialists*, pp. 1438–1442, 1990.
- [13] J. C. Bisailon, J. R. Cummings, J. S. Culik, J. D. Lesko, P. E. Sims, e J. A. Rand, "Non-traditional light sources for solar cell and module testing," em *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 2000 (Cat. No.00CH37036)*, pp. 1498–1501, 2000.
- [14] K. Emery, D. Myers, e S. Rummel, "Solar simulation-problems and solutions," em *Conference Record of the Twentieth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, vol.2, pp. 1087–1091, 1988.
- [15] V. P. Foyle e J. E. Guillet, "A simple artificial light system for solar simulated irradiation of polymeric materials," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 61, no. 11, pp. 3421–3424, Nov. 1990.
- [16] M. G. Guvench, C. Gurcan, A. M. Denis, e D. MacDonald, "Automated testing and parameter extraction of solar cells fabricated from 6-8 inch large test wafers," em *Proceedings of the 15th Biennial University/Government/ Industry Microelectronics Symposium (Cat. No.03CH37488)*, pp. 364–365.
- [17] F. Nagamine, R. Shimokawa, M. Suzuki, e T. Abe, "New solar simulator for multi-junction solar cell measurements," em *Conference Record of the Twenty Third IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1993 (Cat. No.93CH3283-9)*, pp. 686–690.
- [18] S. Kohraku e K. Kurokawa, "New methods for solar cells measurement by LED solar simulator," em *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of*, 2003, vol. 2, p. 1977–1980 2003.
- [19] Y. Tsuno, Koichi Kamisako, e K. Kurokawa, "New generation of PV module rating by LED solar simulator - A novel approach and its capabilities," em *2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1–5, 2008.
- [20] M. Bliss, T. R. Betts, e R. Gottschalg, "An LED-based photovoltaic measurement system with variable spectrum and flash speed," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 93, no. 6–7, pp. 825–830, Jun. 2009.
- [21] M. Bliss, S. Wendlandt, T. Betts, e R. Gottschalg, "Towards a High Power, All LED Solar Simulator Closely Matching Realistic Solar Spectra. 2009.
- [22] M. Bliss, T. R. Betts, e R. Gottschalg, "Performance measurements at varying irradiance spectrum, intensity and module temperature of amorphous silicon solar cells," em *2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 002660–002665, 2010.
- [23] A. M. Bazzi, Z. Klein, M. Sweeney, K. P. Kroeger, P. S. Shenoy, e P. T. Krein, "Solid-State Solar Simulator," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, no. 4, pp. 1195–1202, Jul. 2012.
- [24] K. T. Martin, O. C. B. de Araújo, S. A. Bonaldo e M. F. da Silva, "Solid-state light simulator for horticultural applications," *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, Juiz de Fora, pp. 1-6, 2017.
- [25] K. T. Martin, O. C. B. de Araújo, S. A. Bonaldo e M. F. da Silva, "Conception and design of a lighting system based on Light Emitting Diodes for spectrum simulation," *2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, Curitiba, pp. 1-6, 2016.
- [26] W. J. Smith, *Modern Optical Engineering*, 4^a ed. McGraw-Hill Education, 2007.
- [27] B. H. Hamadani *et al.*, "Towards realization of a large-area light-emitting diode-based solar simulator," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, p. n/a-n/a, Jan. 2012.
- [28] S. Saadaoui, A. Torchani, T. Azizi, e R. Gharbi, "Hybrid halogen-LED sources as an affordable solar simulator to evaluate Dye Sensitized Solar Cells," em *2014 15th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, pp. 884–887, 2014.
- [29] A. Namin, C. Jivacate, D. Chenvidhya, K. Kirtikara, e J. Thongpron, "Construction of Tungsten Halogen, Pulsed LED, and Combined Tungsten Halogen-LED Solar Simulators for Solar Cell I-V Characterization and Electrical Parameters Determination," *Int. J. Photoenergy*, vol. 2012, pp. 1–9, 2012.

- [30] IBM, “CPLEX Optimizer.” 2015.
- [31] International Electrotechnical Commission, “IEC61000-3-2 Electromagnetic compatibility (EMC), Part 3-2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current <16 A per phase),” 2014.
- [32] D. Gacio, J. M. Alonso, A. J. Calleja, J. Garcia, e M. Rico-Secades, “A Universal-Input Single-Stage High-Power-Factor Power Supply for HB-LEDs Based on Integrated Buck-Flyback Converter,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 2, pp. 589–599, Fev. 2011.
- [33] Q. Luo, J. Huang, Q. He, K. Ma, e L. Zhou, “Analysis and Design of a Single-Stage Isolated AC–DC LED Driver With a Voltage Doubler Rectifier,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 7, pp. 5807–5817, Jul. 2017.
- [34] Y. Wang, Y. Guan, K. Ren, W. Wang, e D. Xu, “A Single-Stage LED Driver Based on BCM Boost Circuit and LLC Converter for Street Lighting System,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 9, pp. 5446–5457, Set. 2015.
- [35] Y. Wang, N. Qi, Y. Guan, C. Cecati, e D. Xu, “A Single-Stage LED Driver Based on SEPIC and LLC Circuits,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 7, pp. 5766–5776, Jul. 2017.
- [36] G. G. Pereira, M. A. Dalla Costa, J. M. Alonso, M. F. De Melo, e C. H. Barriquello, “LED Driver Based on Input Current Shaper Without Electrolytic Capacitor,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 6, pp. 4520–4529, Jun. 2017.
- [37] D. Camponogara, D. R. Vargas, M. A. Dalla Costa, J. M. Alonso, J. Garcia, e T. Marchesan, “Capacitance Reduction With An Optimized Converter Connection Applied to LED Drivers,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 1, pp. 184–192, Jan. 2015.
- [38] F. Zhang, J. Ni, e Y. Yu, “High Power Factor AC-DC LED Driver With Film Capacitors,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 10, pp. 4831–4840, Out. 2013.
- [39] Y. Wang, Y. Guan, D. Xu, e W. Wang, “A CLCL Resonant DC/DC Converter for Two-Stage LED Driver System,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 5, pp. 2883–2891, Maio 2016.
- [40] P. S. Almeida, D. Camponogara, M. Dalla Costa, H. Braga, e J. M. Alonso, “Matching LED and Driver Life Spans: A Review of Different Techniques,” *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 9, no. 2, pp. 36–47, Jun. 2015.
- [41] C. Branas, F. J. Azcondo, e J. M. Alonso, “Solid-State Lighting: A System Review,” *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 7, no. 4, pp. 6–14, Dez. 2013.
- [42] Y. Wang, J. M. Alonso, e X. Ruan, “A Review of LED Drivers and Related Technologies,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 7, pp. 5754–5765, Jul. 2017.
- [43] S. Li, S.-C. Tan, C. K. Lee, E. Waffenschmidt, S. Y. R. Hui, e C. K. Tse, “A Survey, Classification, and Critical Review of Light-Emitting Diode Drivers,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 2, pp. 1503–1516, Fev. 2016.
- [44] S. Muthu, F. J. Schuurmans, e M. D. Pashley, “Red, green, and blue LED based white light generation: issues and control,” em *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting* (Cat. No.02CH37344), vol. 1, pp. 327–333, 2002.
- [45] T. Rossing, *Springer Handbook of Acoustics*. Springer New York, 2007.
- [46] P. S. Almeida, G. M. Soares, D. P. Pinto, e H. A. C. Braga, “Integrated SEPIC buck-boost converter as an off-line LED driver without electrolytic capacitors,” em *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 4551–4556, 2012.
- [47] R. W. Erickson e D. Maksimovi, *Fundamentals of Power Electronics*. Boston, MA: Springer US, 2001.

DADOS BIOGRÁFICOS

Klaus Tesser Martin, possui graduação (2015) e mestrado (2017) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria. Atualmente, realiza doutorado em Engenharia Elétrica pela mesma universidade. Desde 2018, trabalha no Instituto Federal Farroupilha – campus Jaguari, onde atua como Professor de Ensino Básico, Técnico e Tecnológico.

Olinto César Bassi de Araújo, possui graduação em Licenciatura Plena em Matemática pela Universidade da Região da Campanha, URCAMP, mestrado em Modelagem Matemática pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, UNIJUI, e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP. Atualmente é Professor de Ensino Básico, Técnico e Tecnológico do Colégio Técnico Industrial de Santa Maria – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil. Tem interesse principalmente nos seguintes temas: Otimização Combinatória, Programação Inteira, Heurísticas e Metaheurísticas.

Saul Azzolin Bonaldo, possui graduação (1996) e mestrado (1998) em Engenharia Elétrica e doutorado (2015) em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil. Desde 2008, trabalha na Universidade Federal de Santa Maria, onde é professor no Colégio Técnico Industrial de Santa Maria (CTISM). Atua no grupo Nightwind – Criatividade e Inovação e suas áreas de interesse envolvem automação de processos, criatividade e inovação.

Marcelo Freitas da Silva, nasceu em São Paulo, Brasil, em 1970. É bacharel (1995), mestre (2000) e doutor (2012) em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil. Em 2013, atuou na Universidade de Oviedo, Espanha, como bolsista de pesquisa de pós-doutorado. Desde 1993, trabalha na Universidade Federal de Santa Maria, onde é professor no Colégio Técnico Industrial de Santa Maria (CTISM). Atuou no Grupo de Estudo e Desenvolvimento de Reatores Eletrônicos (GEDRE), Universidade Federal de Santa Maria. Atualmente, atua no Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento de Sistemas Elétricos e Computacionais (GSEC). Seus interesses de pesquisa incluem reatores eletrônicos, lâmpadas, correção de fator de potência, lâmpadas fluorescentes e LEDs.