

CARACTERIZAÇÃO ELETROTÉRMICA APLICADA AO ESTUDO DAS COORDENADAS CROMÁTICAS EM LEDs RGB

William Dotto Vizzotto¹, Guilherme Gindri Pereira¹, Odirlan Iaronka¹, Vitor Cristiano Bender¹, Marco Antônio Dalla Costa¹, Tiago Bandeira Marchesan¹, Elvo Calixto Burini Jr.²

1 - GEDRE, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, Brasil

2 - Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil

e-mail: guilhermepereira@gedre.ufsm.br

Resumo - O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia de análise das coordenadas de cromaticidade em LEDs RGB, considerando a influência da temperatura de junção nas mesmas. Uma revisão teórica dos conceitos de colorimetria é realizada, bem como uma demonstração do equacionamento de fluxo luminoso que considera o efeito das características térmicas e elétricas dos LEDs. Os resultados das equações que representam a temperatura do dissipador e da junção dos LEDs são comparados com simulações em elementos finitos e com medições experimentais. A equação do fluxo luminoso é relacionada com as matrizes dos valores tristímulo a fim de obter-se uma relação precisa entre as condições de operação do LED e a cor desejada. Por fim, ensaios com o objetivo de comprovação dos resultados teóricos em comparação com os resultados experimentais são apresentados.

Palavras-Chave – Análise Térmica, Colorimetria, Controle de Cor, Coordenada de Cromaticidade, Método de Elementos Finitos, LEDs RGB, Fluxo Luminoso.

ELECTROTHERMAL CHARACTERIZATION APPLIED TO THE STUDY OF CHROMATICITY COORDINATES IN RGB LEDs

Abstract – The purpose of this paper is the development of a methodology to analyze the chromaticity coordinates in RGB LEDs, considering the influence of the junction temperature. A review of theoretical concepts of colorimetry was performed, as well as a demonstration of the luminous flux equation that considers the effect of thermal and electrical characteristics of LEDs. The results of the equations that represent the heatsink and junction temperature of the LEDs are compared to Finite Element Method simulations and experimental measurements. The equation of the luminous flux is related to the matrices of the tristimulus values, in order to achieve a precise relationship between the LED's operation condition and the desired color. Finally, experimental results are presented in order to prove the design methodology.¹

Keywords – Thermal analysis, Colorimetry, Color control, Chromaticity Coordinates, Finite Elements Method, LEDs RGB, Luminous Flux.

I. INTRODUÇÃO

Diversos estudos sobre diodos emissores de luz (LEDs) têm sido realizados nos últimos anos, isso se justifica pela elevada vida útil, alta eficácia, robustez, economia de energia, entre outras vantagens apresentadas por esses dispositivos. Na área da iluminação, o desenvolvimento na tecnologia de LEDs se torna economicamente interessante, visto que cerca de 20 % da energia elétrica mundial é destinada à iluminação [1].

Dentro da área de iluminação decorativa, os LEDs estão sendo utilizados cada vez mais. Neste quesito, destacam-se os LEDs RGB (*Red-Green-Blue*). O grande atrativo nestes dispositivos é a possibilidade de mudança instantânea de cor e o controle da intensidade luminosa. Suas principais aplicações são em iluminação de fundo e iluminação decorativa em geral. Quando utilizados como fonte de luz branca, os LEDs RGB apresentam também uma maior eficácia luminosa quando comparados ao LEDs azuis recobertos por fósforo, apesar de exigirem um controle mais complexo, serem mais caros e apresentarem um maior desvio de cromaticidade com a temperatura [2].

No entanto, uma característica que merece atenção no emprego dos LEDs é a de que uma parcela considerável da energia é transformada em calor, aumentando a temperatura da junção do dispositivo [3]. O aumento da temperatura de junção reduz a intensidade da luz emitida pelos LEDs [4]. Cada cor é afetada diferentemente, tornando necessária uma análise detalhada do comportamento do conjunto de LEDs quando submetidos a variações de temperatura de junção.

O objetivo do presente trabalho é realizar um equacionamento das coordenadas de cromaticidade, para que se possa analisar o comportamento das mesmas em virtude da variação de parâmetros como, por exemplo, a corrente direta e a temperatura ambiente. Para isto, são utilizadas ferramentas de simulação de elementos finitos e testes práticos em uma esfera integradora. Deste modo, é possível definir uma determinada coordenada de cromaticidade e encontrar a corrente necessária para cada LED (vermelho, verde e azul) sintetizar a cor da luz desejada, sem que para isso seja necessário um sistema de realimentação óptico como em [2].

¹Artigo submetido em 14/11/2012. Primeira revisão em 16/01/2013, segunda revisão em 03/04/2013. Aceito para publicação em 10/04/2013 por recomendação do editor Ricardo Nederson do Prado.

II. CARACTERÍSTICAS DOS LEDs RGB

A. Colorimetria

Comumente são empregadas duas formas para obtenção de luz branca com LEDs. A primeira se faz através de um LED azul recoberto por fósforo amarelo, a segunda utiliza dois ou mais LEDs de cores diferentes que quando corretamente combinadas sintetizam a cor branca. Quando o objetivo é obter diferentes cores, podem ser empregados três LEDs, sendo um verde, um vermelho e um azul, assim pode-se sintetizar qualquer cor dentro do triângulo formado por eles no diagrama cromático CIE 1931 [5]. A Figura 1 ilustra a emissão espectral das fontes primárias nas duas formas citadas para obter luz branca, sendo a Figura 1.a. através do método com LEDs RGB e a Figura 1.b. através do LED azul recoberto com fósforo amarelo. Lâmpadas que utilizam LEDs RGB podem representar, praticamente, qualquer cor no espectro, possuindo ainda uma elevada eficácia luminosa [2].

O diagrama de cromaticidade CIE1931, mostrado pela Figura 2, representa matematicamente a percepção da cor pelo olho humano. Neste plano, qualquer cor pode ser representada por duas coordenadas (x, y), sendo que nas bordas estão localizadas as cores puras e saturadas e a luz branca está representada no centro [3], [4].

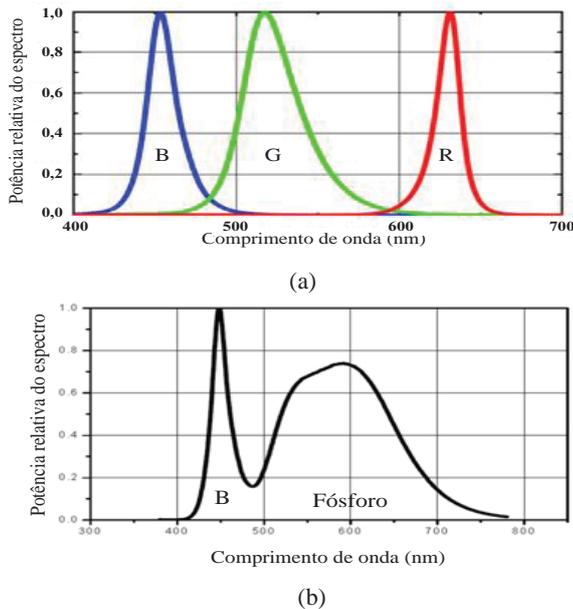


Fig. 1. Comparação entre dois modos de obtenção de luz branca com LEDs. a) LEDs RGB. b) LED azul recoberto com uma camada de fósforo amarelo [6].

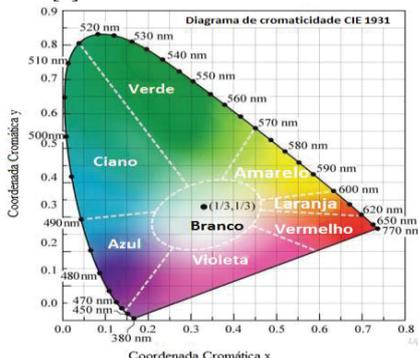


Fig. 2. Diagrama de Cromaticidade CIE1931 [4]

Para a utilização em fontes de luz, a forma de mistura das cores utilizada é a aditiva, sendo que cada banda espectral ou cor vermelha, verde e azul, é considerada um vetor independente. Esses três vetores formam um espaço de cor. Um exemplo da soma dos vetores das três cores para formar a cor branca pode ser visto na Figura 3. Como o olho humano possui diferente sensibilidade espectral para cada região do espectro óptico, existem várias combinações de intensidades das fontes RGB que podem resultar no branco, portanto, estabelecendo-se um padrão para a cor branca, podem-se produzir todas as outras cores a partir deste padrão [7].

Quando se realiza a manipulação de cores com LEDs RGB, utiliza-se o conceito de espaço de cor, que é um espaço tridimensional composto de matiz, saturação e brilho. Matiz e saturação são representados no diagrama de cromaticidade da Figura 2, porém, neste caso, o brilho também deve ser considerado. Já que uma determinada cor pode ser representada por um parâmetro de luminância Y e duas coordenadas x e y, é possível determinar os valores tristímulos XYZ, conforme indicado de (1) a (3) [8]. Para um sistema utilizando as componentes RGB, a soma dos valores tristímulos XYZ de cada estímulo de cor utilizada será o valor do estímulo de cor C desejada, resultando em equações cromáticas (4) a (6) [7].

$$X_i = \frac{x_i}{y_i} Y_i \quad (1)$$

$$Y_i = Y_i \quad (2)$$

$$Z_i = \frac{1 - x_i - y_i}{y_i} Y_i \quad (3)$$

$$X_c = X_r + X_g + X_b \quad (4)$$

$$Y_c = Y_r + Y_g + Y_b \quad (5)$$

$$Z_c = Z_r + Z_g + Z_b \quad (6)$$

Onde:

X_i, Y_i e Z_i : valores tristímulos do estímulo das cores primárias;

x_i, y_i : Coordenada de cromaticidade das cores primárias;

X_c, Y_c e Z_c : valores tristímulos do estímulo da cor desejada.

Os índices r, g e b representam os LEDs vermelho, verde e azul, respectivamente. O índice i refere-se também às três cores citadas, sendo substituídos por r, g ou b.

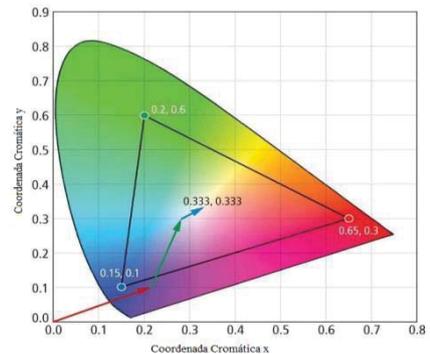


Fig. 3. Soma vetorial de cores no diagrama CIE 1931 [9]

Para melhor visualização, em (7) são mostrados os tristímulos para o estímulo da cor desejada, X_c , Y_c e Z_c , em forma de matriz. A equação (8) mostra a luminância [cd/m^2] necessária para obter o estímulo da cor desejada, sendo que x_c e y_c são as coordenadas de cromaticidade que caracterizam a emissão luminosa desejada.

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r & x_g & x_b \\ y_r & y_g & y_b \\ 1 - x_r - y_r & 1 - x_g - y_g & 1 - x_b - y_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_r \\ Y_g \\ Y_b \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} Y_r \\ Y_g \\ Y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r & x_g & x_b \\ y_r & y_g & y_b \\ 1 - x_r - y_r & 1 - x_g - y_g & 1 - x_b - y_b \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 - x_c - y_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

B. Modelo eletrotérmico para LEDs RGB

O fluxo luminoso de um LED é influenciado principalmente por dois fatores: a corrente elétrica que circula pelo dispositivo e a temperatura de junção do semiconductor considerado. Com o aumento da corrente elétrica, a potência dissipada pelo dispositivo é maior, refletindo em um acréscimo na temperatura de junção.

Vários estudos abordam a relação entre características ópticas (fluxo luminoso e eficácia luminosa), térmicas (temperatura da junção, do dissipador e do ambiente) e elétricas (tensão e corrente diretas) [10], [11], [12], [13].

A relação entre fluxo luminoso, corrente direta e temperatura de junção é representada graficamente na folha de dados dos LEDs, através de duas curvas, que podem ser aproximadas por retas através de regressões lineares [14].

No caso de LEDs RGB, é importante destacar que a luminosidade relativa de cada LED é afetada diferentemente. Além disso, também há um deslocamento da distribuição espectral da emissão, decorrente da variação da energia de recombinação [15]. O aumento da temperatura de junção reduz a energia de recombinação, elevando o comprimento de onda máximo, e com isto a distribuição espectral de emissão fica transladada no sentido da radiação infravermelha. Ou seja, o aumento da temperatura de junção também causa uma mudança nas coordenadas de cromaticidade na saída de luz da luminária.

A Figura 4 ilustra o comportamento local do fluxo luminoso para cada tipo de LED em função da corrente que circula no dispositivo, enquanto Figura 5 considera a influência típica da temperatura de junção.

A dependência da temperatura é diferente para cada cor, como representada na Figura 5. Esta dependência é explicada basicamente por dois fatores. O primeiro está relacionado ao confinamento dos portadores que é maior em LEDs azuis e verdes, devido ao composto GaN. Isto reduz a fuga de portadores, aumentando a taxa de recombinação nestes dispositivos. O segundo fator diz respeito à disponibilidade de lacunas, que se torna menor em elevadas temperaturas, diminuindo a eficiência de produzir radiação. Este fenômeno ocorre frequentemente nos compostos AlGaInP, responsáveis pela emissão de comprimentos de onda maiores que 555 nm [15].

Em [16] é realizado um equacionamento no qual as características térmicas e elétricas são consideradas para se

obter o fluxo luminoso. Uma analogia da parte térmica de um sistema RGB pode ser realizada com um circuito elétrico, conforme a Figura 6. As fontes de corrente Q_r , Q_g e Q_b representam o calor [W] gerado pelos LEDs vermelho, verde e azul, respectivamente. Logo após, têm-se as respectivas temperaturas da junção de cada LED, bem como as resistências térmicas da junção. T_{hs} representa a temperatura média do dissipador, no qual estão dispostos os três LEDs, e R_{hs} , a resistência térmica do mesmo. T_a representa a temperatura ambiente.

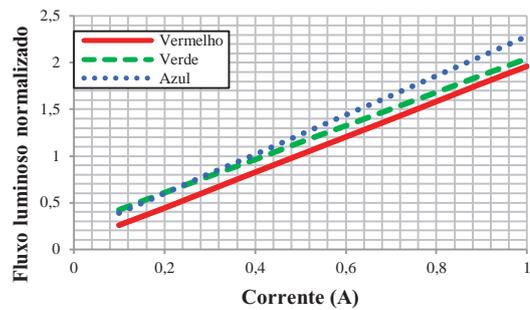


Fig. 4. Fluxo luminoso normalizado em função da corrente [14].

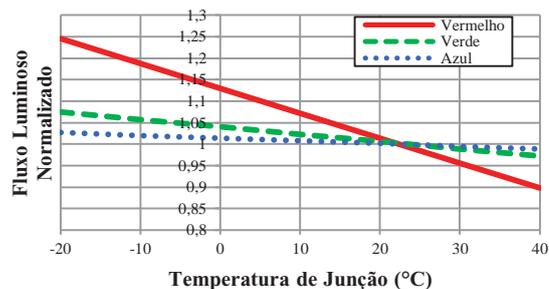


Fig. 5. Influência da temperatura de junção nas diferentes cores de LEDs [14].

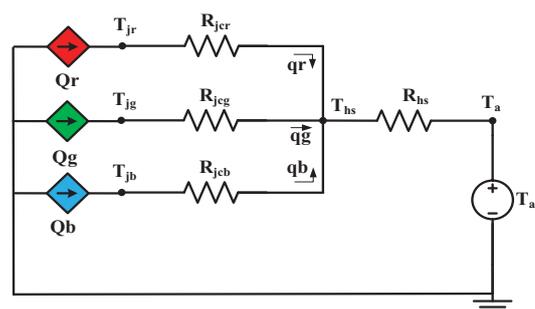


Fig. 6. Modelo térmico para LEDs RGB.

Para quantificar o calor produzido por cada LED, considera-se a potência elétrica aplicada ao dispositivo e um fator que representa a porção que este dispositivo transforma em calor, conforme (9).

$$Q_i = n_i V_{fi} I_{fi} k_h \quad (9)$$

Onde:

Q_i : calor gerado pelo LED R, G ou B [W].

n_i : Número de LEDs.

V_{fi} : Tensão direta do LED [V].

I_{fi} : Corrente direta do LED [A].

k_{fi} : Fator que representa a quantidade da potência elétrica que é transformada em calor pelo LED, aproximadamente 0,85 [17].

A tensão direta do dispositivo, V_{fi} , é representada por (10).

$$V_{fi} = V_{0i} + R_{si}I_{fi} + k_{vi}(T_{ji} - T_0) \quad (10)$$

Onde:

T_{ji} : Temperatura de junção do LED [$^{\circ}\text{C}$].

V_{0i} : Tensão limiar do LED [V].

R_{si} : Resistência série do LED [Ω].

k_{vi} : Fator que representa o decréscimo da tensão com o aumento da temperatura de junção [$\text{V}/^{\circ}\text{C}$].

T_0 : Temperatura em que os testes da folha de dados foram realizados, normalmente 25°C .

Após definir quanto calor é produzido, pode-se definir a temperatura do dissipador, que é representada por (11), onde são consideradas as resistências térmicas do sistema.

$$T_{hs} = T_a + R_{hs}(Q_r + Q_g + Q_b) \quad (11)$$

A temperatura da junção, T_{ji} , de cada dispositivo pode ser calculada através da equação (12), considerando-se o modelo apresentado na Figura 6. Os valores de R_{hs} e R_{jci} são dados do fabricante [14].

$$T_{ji} = T_{hs} + R_{jci}Q_i \quad (12)$$

Onde:

R_{hs} : Resistência térmica do dissipador [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$].

T_a : Temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$].

R_{jci} : Resistência térmica da junção do LED [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$].

Sendo assim, o fluxo luminoso total de cada cor pode ser descrito por (13), onde se têm a influência da temperatura da junção e da corrente direta do dispositivo em conjunto:

$$F(I_{fi}) = n_i F_{0i} (c_{0i} + c_{1i} T_{ji}) (d_{0i} + d_{1i} I_{fi}) \quad (13)$$

Onde:

F_{0i} : Fluxo nominal do LED [lm].

c_{0i} e d_{0i} : Coeficientes lineares das curvas do fluxo luminoso em função da temperatura de junção e da corrente, respectivamente.

c_{1i} e d_{1i} : Coeficientes angulares das curvas do fluxo luminoso em função da temperatura de junção e da corrente, respectivamente.

Esses coeficientes são calculados a partir das curvas das Figuras 4 e 5, fornecidas na folha de dados do fabricante. As curvas são aproximadas por retas através de regressões lineares, e destas retas são calculados os coeficientes.

A equação (13) relaciona o fluxo luminoso produzido por cada LED com sua respectiva emissão espectral de radiação na banda do visível (cor), em função das características elétricas e térmicas fornecidas pelas equações (10) e (12) respectivamente. A partir desta equação pode-se determinar a influência dos demais LEDs dispostos no mesmo dissipador, mesmo que eles tenham características construtivas

diferentes, e sejam operados em diferentes potências elétricas.

A curva típica obtida através da equação (13) é mostrada na Figura 7. Um aspecto importante é que o comportamento do fluxo luminoso de um LED é aproximadamente parabólico e não linear como apresentado anteriormente.

Se o comportamento linear for considerado, a partir do ponto “a” na Figura 7, erros na quantidade de fluxo luminoso ocorrem, conseqüentemente há uma alteração na cor resultante do LED RGB. Sendo assim, é necessário considerar (4), a fim de obter resultados mais precisos no cálculo das coordenadas cromáticas.

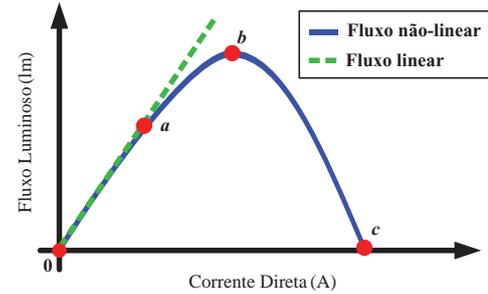


Fig. 7. Comparação entre uma aproximação linear e o comportamento não linear (real) do fluxo luminoso de um LED.

III. CARACTERIZAÇÃO DA CROMATICIDADE DE LEDS RGB

A. Coordenadas cromáticas em função da temperatura ambiente e da corrente direta

Os projetistas de luminárias RGB têm preocupação com o deslocamento das coordenadas cromáticas quando há controle da intensidade luminosa ou variação na temperatura de junção do LED. Diversas técnicas para reduzir o deslocamento cromático já foram propostas [18], [19], [20], [21], [22]. Porém, a maioria dos estudos analisa apenas experimentalmente as coordenadas cromáticas individuais, conforme se deduz de (14) a (17).

Propõem-se, então, equações que definam as coordenadas cromáticas a partir das equações de fluxo de cada LED RGB, dependentes da temperatura de junção, temperatura ambiente e corrente direta de cada um.

A partir de (7), pode-se montar um sistema de equações lineares que relacionam as coordenadas cromáticas da mistura dos LEDs RGB com os seus respectivos fluxos (Y_r , Y_g e Y_b , que dependem da corrente direta e da temperatura) e coordenadas cromáticas individuais.

$$\frac{x_c}{y_c} Y_c = \frac{x_r}{y_r} Y_r + \frac{x_g}{y_g} Y_g + \frac{x_b}{y_b} Y_b \quad (14)$$

$$\frac{1-x_c-y_c}{x_c} Y_c = \frac{1-x_r-y_r}{y_r} Y_r + \frac{1-x_g-y_g}{y_g} Y_g + \frac{1-x_b-y_b}{y_b} Y_b \quad (15)$$

Substituindo o lado direito da igualdade das equações (14) e (15) por X_c e Z_c , respectivamente, obtém-se um sistema linear o qual resulta em (16) e (17):

$$y_c = \frac{1}{\frac{X_c}{Y_c} + \frac{Z_c}{Y_c} + 1} \quad (16)$$

$$x_c = \frac{1}{\frac{Z_c + Y_c}{X_c} + 1} \quad (17)$$

Portanto, podem-se obter as coordenadas cromáticas da cor resultante da mistura dos LEDs RGB quando cada um tem uma determinada corrente direta. Por outro lado, as equações (16) e (17) permitem analisar possíveis deslocamentos que venham a ocorrer com a variação da temperatura ambiente, ou da corrente direta dos LEDs.

As equações (16) e (17) também são úteis quando se deseja controlar a intensidade luminosa do LED, neste caso, há a possibilidade de analisar o quanto as coordenadas cromáticas se deslocam e se há a necessidade de realizar um controle para suprir este deslocamento.

B. Corrente direta dos LEDs em função das coordenadas cromáticas

Quando o objetivo do sistema é sintetizar uma determinada cor, precisa-se definir a corrente direta aplicada em cada LED RGB. Como as coordenadas cromáticas (x e y) dependem do fluxo luminoso de cada cor, e este é influenciado pela corrente direta do LED, existe a possibilidade de relacionar as coordenadas cromáticas com a corrente dos LEDs.

O processo inverso utilizado em (16) e (17) para calcular as coordenadas cromáticas deve ser feito. Primeiro, definem-se todos os parâmetro térmicos e elétricos, deixando a corrente direta como variável independente, as coordenadas cromáticas (x e y) desejadas e o fluxo luminoso total necessário.

De (8) retira-se a intensidade percentual necessária de cada cor. Multiplicando-se essa quantidade pelo fluxo total desejado, obtêm-se os fluxos de cada cor. Ao analisar o gráfico que relaciona fluxo luminoso e a corrente direta, considerando-se o efeito da temperatura da junção, mostrado na Figura 8, sabe-se qual a corrente que aplicada a cada cor irá produzir o fluxo necessário.

Por exemplo, para obter a cor branca, com as coordenadas (0,3333 ; 0,3333). Determina-se um fluxo luminoso total de 100 lumens, assim, as cores vermelha, verde e azul, devem produzir, respectivamente, 31, 54 e 15 lumens cada. Na

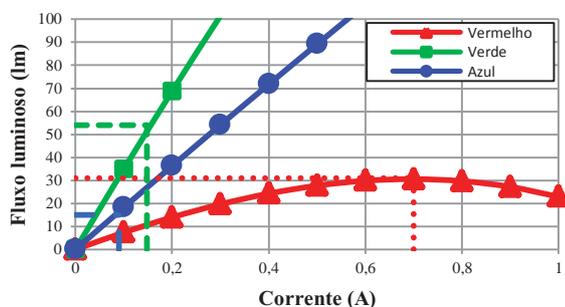


Fig. 8. Fluxo luminoso calculado para cada LED, com as respectivas correntes para a obtenção da cor desejada.

Figura 8, a relação entre o fluxo luminoso de cada LED, vermelho, verde e azul, é apresentada. Como os fluxos luminosos necessários para cada cor foram definidos anteriormente, basta relacionar a corrente direta que produz esse fluxo. Para o exemplo anterior, as correntes necessárias para os LEDs vermelho, verde e azul, são, 700 mA, 146 mA e 87 mA, respectivamente.

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS

Com o objetivo de confirmar a aplicabilidade da metodologia abordada anteriormente, foram realizadas simulações e testes. A ferramenta de simulação utilizada foi o Método de Elementos Finitos (MEF) através do programa computacional ANSYS®. Esse método consiste na subdivisão de um meio contínuo, tornando-o um meio discreto formado por elementos interligados que mantêm as mesmas propriedades do meio que os originou. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos para que sejam obtidos os resultados desejados em várias áreas de aplicação. Através da determinação correta dos parâmetros iniciais e de contorno do sistema, como temperatura, pressão, potência dissipada e velocidade do ar, é possível determinar o comportamento térmico total do sistema de iluminação [16].

Utilizou-se também um termômetro Fluke 51 II e um termovisor Fluke Ti25, enquanto para os testes das coordenadas cromáticas, utilizaram-se fontes independentes de corrente para cada LED RGB, uma esfera integradora e um espectrofotômetro/colorímetro, conforme o esquemático da Figura 9.

Os parâmetros dos LEDs utilizados (LUXEON REBEL STAR LXML-PM01-0080, LXML-PB0130 e LXML-PD01-0040) [13] seguem na Tabela I. Foram utilizados um LED de cada cor, com corrente nominal, I_{f0} , de 700 [mA] cada, testados à uma temperatura ambiente, T_0 , de 25[°C] e com o fator k_{vi} igual à -0,004 [mV/°C] para todos os LEDs. As potências elétricas [W] dos LEDs vermelho, verde e azul são respectivamente, 1,47, 2,03 e 2,12.

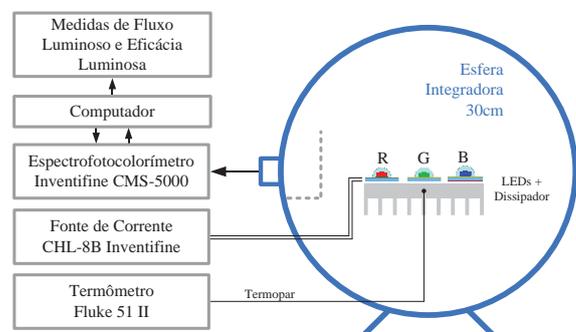


Fig. 9. Esquemático da plataforma de testes.

TABELA I

Parâmetros elétricos, térmicos e fotométricos de cada LED

Coefficiente/Cor	V ₀	R _s	c ₀	c ₁	d ₀	d ₁	k _v	R _{jc}	F ₀	R _{hs}	x _i	y _i
Vermelho	2,1	2	1,132	-0,0058	0	1,9	-0,004	12	75	4,39	0,7059	0,2940
Verde	2,75	0,571	1,043	-0,0018	0	1,9	-0,004	10	139	4,39	0,1826	0,7086
Azul	2,375	0,514	1,01373	-0,00063	0	2,1	-0,004	10	58	4,39	0,1080	0,1381

A. Temperatura da junção dos LEDs com diferentes características de operação

Os três modelos de LEDs citados anteriormente foram dispostos sobre um dissipador de alumínio com resistência térmica, R_{hs}, de 4,39°C/W, com dimensões 10cmx4,5cmx2cm, o qual foi dimensionado para dissipar o calor dos LEDs no pior caso de operação, ou seja, com a potência máxima. Os LEDs ficaram igualmente espaçados, distantes 1cm das bordas e do LED ao lado.

Para a quantificação dos erros entre os valores medidos e calculados, foi utilizada a equação (18), onde E% é o erro percentual, x_c e y_c são os valores das coordenadas calculados e x_m e y_m são os valores das coordenadas medidos.

$$E\% = 100 * \sqrt{(x_c - x_m)^2 + (y_c - y_m)^2} \quad (18)$$

A Figura 10 apresenta a comparação dos valores de temperatura do dissipador calculados e por medição a partir do termopar. Neste caso, a corrente direta de cada LED foi variada de 0,1 a 0,9 A com um passo de 0,1 A, exceto do LED vermelho, que teve a corrente mantida em 0,35 A. Durante cada alteração no valor da corrente direta dos LEDs, esperou-se determinado tempo para que o sistema entrasse em regime térmico. A temperatura ambiente média foi de 26°C. Observando a Figura 10 percebe-se que o resultado experimental é bastante próximo ao calculado, com um desvio máximo de 7%.

Os resultados de temperatura da junção dos LEDs são comparados na Figura 11, onde a Figura 11.a. representa os dados experimentais e a Figura 11.b. os dados da simulação utilizando o MEF. As temperaturas calculadas, simuladas e obtidas experimentalmente estão dispostas na Tabela II. Estes dados validam as equações (11) e (12). A corrente dos LEDs vermelho, verde e azul são, respectivamente, 300 mA, 700 mA e 300 mA. A temperatura ambiente média igual a 23°C. O LED verde apresentou a maior temperatura, conforme esperado, devido ao arranjo geométrico utilizado.

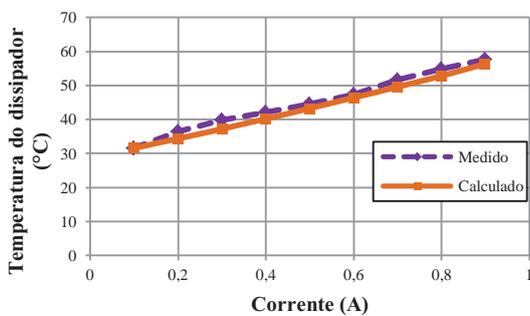


Fig. 10. Comparação entre a temperatura medida e calculada do dissipador.

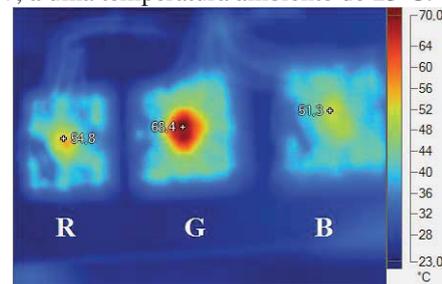
TABELA II
Temperatura de junção (°C)

	Vermelho	Verde	Azul
Calculado	55,62	69,93	52,29
Simulado	51,7	61,7	47,7
Experimental	54,8	68,4	51,3

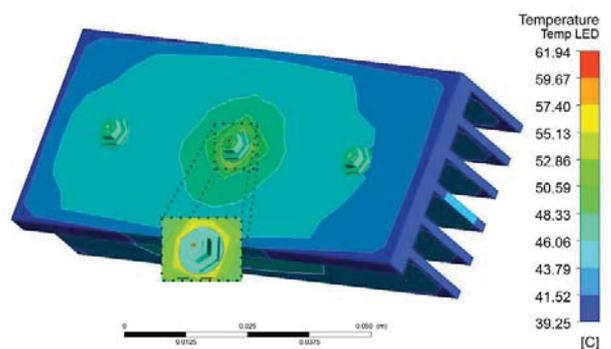
Os valores de simulação são menores que aqueles calculados e medidos experimentalmente pois foi utilizado um modelo simplificado na simulação.

B. Efeitos da variação de corrente direta e temperatura ambiente nas coordenadas cromáticas de sistemas RGB

As coordenadas cromáticas foram calculadas com o auxílio de um programa matemático, utilizando a metodologia desenvolvida, e comparadas às medidas experimentalmente. A corrente direta foi variada em todos os LEDs, igualmente, de 0,1 A a 0,9 A com passo de 0,1 A. Três LEDs (vermelho, verde e azul) foram dispostos sobre um mesmo dissipador, com resistência térmica de 4,39°C/W, a uma temperatura ambiente de 23°C.



(a)



(b)

Fig. 11. Comparação entre as temperaturas obtidas experimentalmente (a) e nas simulações, com destaque para o LED verde (b).

A comparação entre os resultados calculados e obtidos experimentalmente é representada na Tabela III. O erro entre os dados calculados e medidos não ultrapassou 5%.

O teste anterior foi repetido, mantendo um LED com corrente constante e variando a corrente dos outros dois. O LED de cor verde teve sua corrente mantida constante em

0,7 A, enquanto os LEDs azul e vermelho variaram de 0 A até 0,8 A com um passo de 0,1 A, como pode ser visto na Tabela IV. Foi percebida uma diferença máxima de 4% entre o valor das coordenadas medidas e calculadas.

Quando aplicada uma variação na temperatura ambiente, a metodologia também se mostrou eficiente, conforme a Tabela V. A temperatura ambiente foi variada de 21°C a 48°C, em degrau, com variação de 3°C em 3°C. Os dados obtidos experimentalmente ficaram bem próximos dos dados calculados, com erros menores que 1%.

TABELA III
Comparação entre coordenadas cromáticas calculadas e medidas, com todos os LEDs tendo sua corrente variada

xm	ym	xc	yc	E%
0,2306	0,3306	0,2354	0,3016	2,94%
0,233	0,3176	0,2314	0,3007	1,70%
0,2322	0,3102	0,2266	0,2998	1,18%
0,2232	0,3055	0,2212	0,2987	0,71%
0,2087	0,2975	0,2149	0,2976	0,62%
0,192	0,2954	0,2078	0,2963	1,58%
0,1736	0,29	0,1997	0,2949	2,66%
0,1589	0,2864	0,1906	0,2935	3,25%
0,1474	0,2852	0,1804	0,2918	3,37%

TABELA IV
Varição das coordenadas cromáticas para o LED verde com corrente fixa, enquanto o azul e o vermelho variam

xm	ym	xc	yc	E%
0,1826	0,7086	0,1826	0,7086	0,00%
0,2002	0,4966	0,1875	0,5317	3,73%
0,212	0,4098	0,1883	0,4415	3,96%
0,2133	0,3636	0,1873	0,3866	3,47%
0,2116	0,3324	0,1849	0,3495	3,17%
0,2042	0,3112	0,1815	0,3225	2,54%
0,1932	0,2945	0,1772	0,3019	1,76%
0,1798	0,2857	0,1721	0,2855	0,77%
0,1642	0,277	0,1662	0,272	0,54%

TABELA V
Varição das coordenadas cromáticas quando há variação na temperatura ambiente na faixa de 21°C a 48°C

Ta	xm	ym	xc	yc	E%
21	0,2318	0,3049	0,2249	0,2995	0,88%
24	0,2281	0,3034	0,2235	0,2991	0,63%
27	0,225	0,3031	0,2221	0,2988	0,52%
30	0,2222	0,3017	0,2206	0,2985	0,36%
33	0,2201	0,3024	0,2191	0,2981	0,44%
36	0,2191	0,3023	0,2176	0,2978	0,47%
39	0,217	0,3017	0,2161	0,2974	0,44%
42	0,2148	0,2993	0,2146	0,297	0,23%
45	0,2131	0,3007	0,213	0,2967	0,40%
48	0,2117	0,3002	0,2115	0,2963	0,39%

C. Definição da corrente direta para cada LED a partir da cor desejada.

Testes foram realizados para comprovar que a metodologia também é útil para definição da corrente necessária para se obter determinada cor. Algumas cores foram escolhidas aleatoriamente, bem como o fluxo total, conforme a Tabela VI. A temperatura ambiente se manteve próxima dos 25 °C.

TABELA VI
Coordenadas cromáticas e fluxos totais escolhidos aleatoriamente

Teste	x	y	Fluxo luminoso calculado (lm)	Fluxo luminoso obtido (lm)
1	0,3333	0,3333	100	99,1
2	0,3333	0,3333	70	71,2
3	0,1900	0,4800	50	58,2
4	0,4000	0,4200	50	51,7

A partir de (8), obtém-se a quantidade de fluxo luminoso que cada LED precisa produzir para que a distribuição espectral da luz emitida possa apresentar as coordenadas de cromaticidade definidas aleatoriamente e numeradas de 1 a 4, conforme Tabela VII.

TABELA VII
Fluxo luminoso necessário para cada LED

Teste	Fr	Fg	Fb
1	30,948	54,122	14,93
2	21,664	37,885	10,451
3	1,711	43,865	4,425
4	15,71	31,654	2,637

Repetindo o mesmo procedimento que conduziu ao resultado apresentado pela Figura 8, têm-se as correntes necessárias em cada caso, que são demonstradas na Tabela VIII.

TABELA VIII
Corrente direta (em Amperes) necessária em cada LED para que se obtenha a cor e o fluxo desejados

Teste	iR (A)	iG (A)	iB (A)
1	0,700	0,146	0,087
2	0,340	0,101	0,05
3	0,025	0,118	0,027
4	0,250	0,085	0

Na Figura 12, as coordenadas escolhidas são comparadas com as coordenadas obtidas experimentalmente. A maior diferença entre a coordenada escolhida e a medida experimentalmente foi de 10%. Os fluxos totais não ultrapassaram 5% de desvio relativo. Este erro, bem como os demais encontrados no trabalho, se deve a alguns fatos como o tamanho da esfera integradora, imprecisão dos equipamentos utilizados e variações paramétricas dos LEDs utilizados.

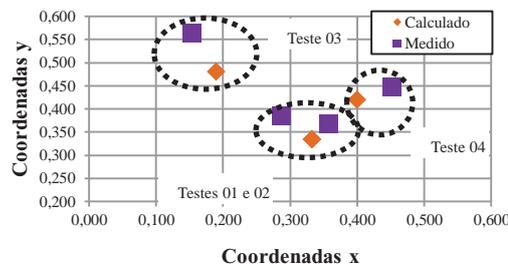


Fig. 12. Coordenadas cromáticas escolhidas aleatoriamente e as obtidas experimentalmente.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho abordou o principal desafio na utilização de sistemas com LEDs RGB, que é o comportamento de deriva ou alteração da emissão espectral, conseqüentemente das coordenadas de cromaticidade, quando algum fator de operação dos LEDs é alterado, como a corrente e a temperatura de operação.

Além de realizada uma revisão sobre LEDs RGB e conceitos de colorimetria, um equacionamento para estabilizar as coordenadas de cromaticidade foi proposto. Este equacionamento partiu de um modelo eletrotérmico desenvolvido, onde parâmetros elétricos, térmicos e de emissão luminosa foram considerados, visto que todos eles são interdependentes. Através disso, foi possível analisar as variações das coordenadas cromáticas, bem como definir a corrente necessária em cada cor para que se obtivesse determinada coordenada de cromaticidade.

A fim de validar a metodologia desenvolvida, testes experimentais foram realizados e comparados com os dados calculados. Também foram realizadas simulações utilizando o MEF, sendo também feita uma comparação com os dados calculados. Essa comparação demonstrou que a metodologia pode ser utilizada para todas as problemáticas propostas no presente trabalho, sendo os desvios aceitáveis, com valor máximo não superior a 10%, o que é aceitável considerando os modelos simplificados utilizados na caracterização eletrotérmica.

O trabalho desenvolvido apresenta aplicações em iluminação decorativa, propiciando o uso de LEDs RGB sem a necessidade do uso de fotodiodos para o controle da luz emitida.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro promovido pelo CNPq.

REFERÊNCIAS

- [1] I. D. C. Vieira, "Projeto de um conversor Flyback auto-oscilante de baixo custo para LEDs de potência", Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - UFMG, 2009.
- [2] S. Muthu, J. Gaines, "Red, green and blue LED-based white light source: implementation challenges and control design", *Industry Applications Conference - IAS*, vol. 1, pp. 515-522, 2003.
- [3] W. Fu-Cheng, T. Chun-Wen, H. Bin-Juine, "Multivariable Robust Control for a Red, Green, Blue LED Lighting System", *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol. 25, pp. 417-428, 2010.
- [4] CREE, "LED Color Mixing: Basics and Background", Disponível em <www.cree.com>, Acesso em: 26 set. 2012.
- [5] CIE, "Proceedings of Commission Internationale de l'Eclairage 1931", Cambridge University Press, 1931.
- [6] S. Buso, G. Spiazzi, "White light solid state lamp with luminance and color temperature control", *Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pp.837-843, 2011.
- [7] Y. Yueh-Ru, "Implementation of a colorful RGB-LED light source with an 8-bit microcontroller", *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp. 1951-1956, 2010.
- [8] Y. Yueh-Ru, "A high-brightness RGB-LED lamp using palette and PNM current driver", *Industrial Electronics*, pp. 3479-3483, 2009.
- [9] G. Kelly, "Understand Color Science to Maximize Success with LEDs - Part 2", *LEDs Magazine*, 2012.
- [10] C. Biber, "LED Light Emission as a Function of Thermal Conditions", *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, pp. 180-184, 2008.
- [11] S. Y. Hui, Y. X. Qin, "A General Photo-Electro-Thermal Theory for Light Emitting Diode (LED) Systems", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, pp. 1967-1976, 2009.
- [12] Y. Fei, G. Weiling, D. Tianping et al., "Thermal and optical properties of power LEDs", *Advances in Optoelectronics and Micro/Nano-Optics (AOM)*, pp. 1-4, 2010.
- [13] J. Garcia, D. G. Lamar, M. A. Dalla Costa et al., "An estimator of luminous flux for enhanced control of high brightness LEDs", *Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1852-1856, 2008.
- [14] PHILIPS, "Luxeon Rebel Color Portfolio", Folha de Especificação, 2012.
- [15] E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes*, Cambridge University Press, 2ª Edição, 2006.
- [16] V. C. Bender, O. Iaronka, M. A. Dalla Costa et al., "An Optimized Methodology for LED Lighting Systems Designers", *IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 4521-4526, 2012.
- [17] Y. X. Qin, D. Y. Lin, S. Y. R. Hui, "A Simple Method for Comparative Study on the Thermal Performance of Light Emitting Diodes (LED) and Fluorescent Lamps", *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 152-158, 2009.
- [18] J. Hasan, S. S. Ang, "A High-Efficiency Digitally Controlled RGB Driver for LED Pixels", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 6, pp. 2422-2429, 2011.
- [19] F. Bernitz, O. Schallmoser, W. Sowa, "Advanced Electronic Driver for Power LEDs with Integrated Colour Management", *Industry Applications Conference*, pp. 2604-2607, 2006.
- [20] Q. Xiaohui, W. Siu Chung, C. K. Tse, "Color Control System for RGB LED Light Sources Using Junction Temperature Measurement", *Industrial Electronics Society*, pp. 1363-1368, 2007.
- [21] K. Lim, L. Joon Chok, G. Panotopoulos et al., "Illumination and Color Management in Solid State Lighting", *Industry Applications Conference*, pp. 2616-2620, 2006.
- [22] T. Chun-Wen, W. Fu-Cheng, H. Bin-Juine, "Design and control of a RGB LED system", *SICE Annual Conference*, pp. 2555-2558, 2010.

DADOS BIOGRÁFICOS

William Dotto Vizzotto, nascido em 10/07/1993 em Itaquí, é graduando em Engenharia Elétrica desde 2011, atualmente cursando o 4º semestre, na Universidade Federal de Santa Maria. Exerce suas atividades de iniciação científica no grupo de pesquisa GEDRE (Grupo de Estudo e Desenvolvimento de Reatores Eletrônicos). Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência, sistemas de iluminação e fontes alternativas de energia.

Guilherme Gindri Pereira, nascido em 10/08/1992 em Santa Maria, é graduando em Engenharia Elétrica desde 2010, atualmente cursando o 5º semestre, na Universidade Federal de Santa Maria. Exerce suas atividades de iniciação científica no grupo de pesquisa GEDRE (Grupo de Estudo e Desenvolvimento de Reatores Eletrônicos). Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência e sistemas de iluminação.

Odirlan Iaronka, nasceu em 1990 na cidade de Casca, RS, Brasil. Em 2009 ingressou na Universidade Federal de Santa Maria no curso de Engenharia Elétrica. Atualmente está cursando o 7º semestre no curso. Exerce a função de bolsista pesquisador ao nível de Iniciação Científica no Grupo de Estudo e Desenvolvimento de Reatores Eletrônicos (GEDRE). Atua na área de Engenharia Elétrica com ênfase em: Eficientização Energética, Iluminação Baseada em Diodos Emissores de Luz (LEDs), gerenciamento térmico de LEDs e Método de Elementos Finitos.

Vitor Cristiano Bender, nasceu em Panambi, RS, Brasil em 1987. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI) em 2011 e Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria em 2012. Atualmente é doutorando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE-UFSM) trabalhando junto ao Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Reatores Eletrônicos (GEDRE). Atua na área de Engenharia Elétrica, com ênfase nos seguintes temas: sistemas de iluminação, reatores eletrônicos, métodos de correção do fator de potência, LED drivers e gerenciamento térmico de LEDs.

Marco Antônio Dalla Costa, nascido em 03/10/1978 em Santa Maria é engenheiro eletricitista (2002), mestre (2004) Universidade Federal de Santa Maria e doutor em Engenharia Elétrica (2008) pela Universidade de Oviedo, Gijón, Espanha. De 2008 a 2009 foi professor associado na Universidade de Caxias do Sul, Brasil. Desde 2009 é professor associado na Universidade Federal de Santa Maria. Suas áreas de interesse são: conversores estáticos, estágios de correção de fator de potência, sistemas de dimerização, reatores eletrônicos de alta frequência, modelagem de lâmpadas de descarga, sistemas de diodos emissores de luz (LEDs), e fontes alternativas de energia. É autor de mais de 25 artigos em periódicos e 50 artigos em congressos internacionais.

Tiago Bandeira Marchesan, nascido em Santa Maria, Brasil, em 1980. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (2003) e doutorado em Engenharia Elétrica (2008) pela mesma Universidade. É pesquisador do grupo GEDRE (Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Reatores Eletrônicos) desde 2000. Atua, principalmente, nas seguintes áreas: reatores eletrônicos, modelagem e simulação de conversores e lâmpadas de descarga de alta pressão.

Elvo Calixto Burini Junior, possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo - USP (1984), mestrado no Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo - PIPGE/USP (1993) e doutorado pelo PIPGE/USP (2002), atuando principalmente nos seguintes temas: energia, iluminação, radiação óptica.