

METODOLOGIA DE PROJETO ELETROTÉRMICO DE LEDs APLICADA AO DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO

Vitor C. Bender, Odirlan Iaronka, William D. Vizzotto,
Marco A. Dalla Costa, Ricardo N. do Prado e Tiago B. Marchesan

Grupo de Inteligência em Iluminação – GEDRE
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria - RS
bender@gedre.ufsm.br

Resumo - Este trabalho apresenta uma metodologia de projeto eletrotérmico de diodos emissores de luz (LEDs) que tem o objetivo de proporcionar indicativos do melhor ponto de operação do LED, considerando seus aspectos térmicos, elétricos e fotométricos. A metodologia está baseada em um modelo eletrotérmico e através de uma análise matemática apresenta resultados teóricos para o projeto de sistemas de iluminação. Exemplos de projeto são desenvolvidos, os resultados teóricos são comparados com simulações computacionais da dinâmica dos fluidos utilizando o método de elementos finitos e por fim comprovados através de resultados experimentais.

Palavras-Chave – Diodos Emissores de Luz, Elementos Finitos, Fluidodinâmica Computacional, Modelo Eletrotérmico, Projeto Térmico, Transferência de Calor.

LED ELECTROTHERMAL DESIGN METHODOLOGY APPLIED TO LIGHTING SYSTEMS

Abstract – This work presents a LED electrothermal design methodology. The methodology aims to provide indicatives of the optimal LED operating point for lighting systems design, considering electrical, thermal and photometrical system features. Different projects are developed according to the methodology, the theoretical results are compared with fluid dynamics simulation and demonstrated by experimental results.¹

Keywords - Computational Fluid Dynamics, Electrothermal Model, Finite Element Method, Light-emitting Diodes, Heat Transfer, Thermal Design.

I. INTRODUÇÃO

Os LEDs são dispositivos semicondutores que apresentam grande potencial para iluminação. O objetivo final dos projetistas de sistemas de iluminação é obter o fluxo luminoso desejado com a mínima variação possível, durante toda a vida útil do sistema. No entanto, quando os LEDs são utilizados em iluminação, para se atingir resultados satisfatórios em um projeto, devem ser consideradas as

diferentes relações existentes entre a corrente e tensão direta, potência elétrica, fotometria e temperatura de operação. O problema está na compreensão da influência desses diferentes aspectos no desempenho dos LEDs.

Em situações onde o gerenciamento térmico é um desafio, como em iluminação automotiva e lâmpadas compactas, o projeto do sistema pode ser complexo [1-4]. Além disso, a principal dificuldade encontrada para a popularização da tecnologia de estado sólido em iluminação tem sido os efeitos causados pela temperatura de operação [5]. As condições térmicas devem ser avaliadas para escolher um ponto de operação considerando sua influência na emissão de luz [6, 7]. Como a temperatura está relacionada à potência aplicada, pesquisadores propuseram uma teoria para determinar o ponto ótimo de operação do sistema a LED, considerando o máximo fluxo luminoso, para um dado sistema térmico [8, 9]. Também foi avaliado o decréscimo do fluxo luminoso com o tempo em virtude dos efeitos da temperatura [10, 11], juntamente com o comportamento fotoelétrico dos LEDs [12]. Em [7] propõem-se algoritmos para a otimização de projetos de sistemas de iluminação, no entanto, no presente trabalho uma análise mais detalhada das influências da temperatura ambiente e das resistências térmicas é apresentada juntamente com uma análise comparativa.

A determinação de um ponto ótimo de operação para LEDs de potência representa um desafio para os projetistas. O fluxo luminoso de um LED é diretamente influenciado pela corrente direta do dispositivo. No entanto, quando a corrente aumenta, a potência consumida pelo LED aumenta proporcionalmente, elevando a quantidade de calor produzida pelo dispositivo. Fato que se reflete na temperatura da junção.

O aumento da corrente elevará o valor da tensão. Como a potência elétrica consumida pelo LED é o produto entre a corrente e a tensão direta, um incremento na tensão direta também elevará o nível de potência consumida, e por consequência o calor gerado na junção.

A temperatura da junção é dependente da temperatura ambiente e da potência aplicada no LED, a sua elevação resulta na redução do fluxo luminoso e da tensão direta.

Este artigo apresenta a interação existente entre os diferentes fatores que afetam o desempenho dos LEDs, através de um modelo eletrotérmico que propicia a descrição matemática de todo o sistema. Uma metodologia de projeto eletrotérmico será proposta, e alguns resultados de simulação e experimentais serão utilizados para comprovação da aplicabilidade da metodologia.

¹Artigo submetido em 10/11/2012. Primeira revisão em 10/03/2013 e segunda revisão em 15/05/2013. Aceito para publicação em 18/05/2013 por Recomendação dos Editores Pedro F. Donoso-Garcia e Henrique A. C. Braga.

II. MODELO ELETROTÉRMICO

O comportamento elétrico dos LEDs é afetado por elevadas perdas ôhmicas, normalmente representadas como resistências parasitas que podem estar em série (R_s) e/ou em paralelo (R_p) [13]. Na relação entre corrente e tensão de um LED (curva I-V) a R_p afeta a corrente para tensões menores que a tensão de limiar. No entanto, por apresentar valor de resistência bem maior que o apresentado pela R_s , representa pouca influência na curva acima da tensão de limiar. A R_s afeta o dispositivo acima da tensão de limiar, sendo a que mais influencia nas perdas dos LEDs quando são aplicados os valores nominais de corrente no dispositivo [13-15].

O comportamento da tensão em função da temperatura da junção e da corrente em um LED pode ser descrito pela equação de Shockley, adicionando o efeito da resistência parasita série, através da variável R_s , como mostra (1) [13].

$$V_f(I_f, T_j) = \frac{n_i k_B T_j}{q_e} \ln\left(\frac{I_f}{I_s}\right) + \frac{E_g(T_j)}{q_e} + R_s I_f \quad (1)$$

onde I_f é a corrente direta, I_s é a corrente de saturação reversa, q_e é a carga elétrica do elétron ($1,602 \times 10^{-19}$ C), V_f é a tensão direta, n_i é o fator de idealidade, k_B é a constante de Boltzmann ($1,3805 \times 10^{-23}$ J/K), T_j é a temperatura da junção, E_g é a energia de recombinação e R_s é a resistência parasita do LED.

Com o objetivo de linearizar o comportamento da corrente em função da tensão nos LEDs, utiliza-se uma aproximação linear, onde o LED é representado por um diodo ideal (D_{ideal}), que caracteriza a unidirecionalidade da corrente, uma fonte de tensão com valor V_o , que representa a tensão de limiar do LED e a resistência parasita série (R_s), responsável pela inclinação existente na curva I-V quando o LED é diretamente polarizado, como mostra a Figura 1.

A determinação dos parâmetros do modelo elétrico simplificado pode ser feita através de uma regressão linear de $V_f(I_f)$. O coeficiente angular obtido quantifica R_s e o coeficiente linear representa V_o . Isso possibilita descrever matematicamente o comportamento da tensão direta em função da corrente direta, conforme (2).

$$V_f(I_f) = V_o + R_s I_f \quad (2)$$

No entanto, o comportamento da curva I-V é dependente da temperatura da junção, ocorrendo uma redução na tensão direta com o aumento da temperatura de operação. Para isso utiliza-se uma fonte de tensão dependente da temperatura, como mostra a Figura 1.

Basicamente, dois acontecimentos explicam o fenômeno da queda de tensão. O primeiro diz respeito à mudança no nível de Fermi. Quando a temperatura aumenta, o nível de Fermi move-se em direção ao meio do espaço de banda, tornando menor a distância entre o lado p e o lado n na junção do LED. Como resultado, uma menor tensão é necessária para uma dada corrente. O segundo está relacionado à redução da energia de recombinação (E_g). Quando a temperatura se eleva, a energia de recombinação dos semicondutores diminui, alterando também o comprimento de onda emitido pelo dispositivo [13, 16, 17].

A magnitude da redução da tensão em função da temperatura (k_v) é dependente da dopagem do semiconductor. Normalmente tem-se uma redução de 1,5 a 4 mV/°C, dependendo do LED [18]. Estes valores são especificados na folha de dados do dispositivo.

Adicionando o efeito da temperatura em (2), tem-se (3), onde k_v representa o coeficiente da redução da tensão em função do aumento da temperatura (coeficiente negativo) e T_o representa a temperatura de referência (normalmente especificada como 25°C).

$$V_f(I_f, T_j) = V_o + R_s I_f + k_v (T_j - T_o) \quad (3)$$

Devido à interação existente entre os domínios elétrico e térmico, diversos pesquisadores têm se empenhado no desenvolvimento de modelos para LEDs [8, 10, 19-22].

Considerando a interdependência existente entre as variáveis térmicas e elétricas, é conveniente considerar o efeito de todos os parâmetros envolvidos no sistema de iluminação empregando LEDs. Assim, é proposto o modelo eletrotérmico mostrado na Figura 1.

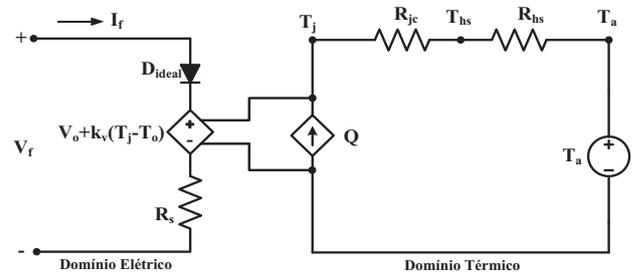


Fig. 1. Modelo eletrotérmico estático simplificado para um LED disposto em um dissipador de calor.

O domínio térmico do modelo apresenta as resistências térmicas da junção para o encapsulamento (R_{jc}) e a resistência térmica do dissipador (R_{hs}). A resistência térmica de contato é desconsiderada, por ter valor reduzido quando comparado à R_{jc} e R_{hs} [23]. A fonte Q representa uma fonte de calor dependente da corrente e da tensão direta do LED, cujo valor pode ser calculado por (4).

$$Q(I_f, V_f) = V_f I_f k_h \quad (4)$$

Como nem todos os elétrons injetados no LED se recombinam emitindo fótons é preciso estimar a parcela de potência elétrica que é transformada em potência radiante e em potência dissipada na forma de calor (k_h) [12, 19, 24, 25].

A temperatura na junção (T_j) e a temperatura no dissipador (T_{hs}) são calculadas por (5) e (6), respectivamente. Onde (T_a) representa a temperatura ambiente e n o número de LEDs dispostos sobre o dissipador de calor.

$$T_{hs} = T_a + n R_{hs} V_f I_f k_h \quad (5)$$

$$T_j = T_{hs} + R_{jc} V_f I_f k_h \quad (6)$$

O modelo eletrotérmico proposto integra o comportamento elétrico apresentado no domínio elétrico juntamente com o comportamento térmico mostrado no domínio térmico da Figura 1. A integração dos dois domínios justifica a utilização de (3), que pode ser modificada com a inserção de (5) e (6), obtendo-se (7), pela qual determina-se a tensão direta em função dos parâmetros térmicos e elétricos.

$$V_f = \frac{V_o + R_s I_f + k_v (T_a - T_o)}{1 - I_f k_h k_v (R_{jc} + nR_{hs})} \quad (7)$$

A determinação da tensão direta em função das características térmicas do sistema é um procedimento que pode ser utilizado como ferramenta para estimar a temperatura da junção [16, 18, 26].

III. METODOLOGIA DE PROJETO ELETROTÉRMICO

Com o progresso significativo dos LEDs, elevado fluxo luminoso e elevada eficácia são necessários para tornar esses dispositivos competitivos com relação às demais fontes de luz existentes no mercado, por exemplo, lâmpadas de descarga de alta pressão [27] e fluorescentes [28]. As correntes de alimentação dos LEDs têm aumentado para níveis acima de 350 mA. No entanto, quando a injeção de corrente aumenta, a eficiência decresce gradualmente [29-33].

A intensidade luminosa dos LEDs decresce com a elevação da T_j , por consequência da queda da eficiência. Os LEDs apresentam diferentes dependências da temperatura, que ocorrem devido à característica dos cristais envolvidos na dopagem [13].

O fluxo luminoso é um parâmetro que possui comportamento não linear, que ocorre basicamente devido a influência de duas variáveis: I_f e T_j . Normalmente, os fabricantes apresentam graficamente a variação do fluxo luminoso em função da corrente direta e também da temperatura da junção.

A descrição matemática do comportamento do fluxo luminoso em função da temperatura da junção é realizada utilizando-se regressão linear, conforme (8) [6, 34].

$$F(T_j) = c_o + c_1 T_j \quad (8)$$

Onde F representa o fluxo luminoso, c_o é o coeficiente linear do fluxo luminoso em função da temperatura, e c_1 é o coeficiente angular que representa a relação do fluxo luminoso com a temperatura da junção.

O comportamento do fluxo luminoso em relação à corrente direta aplicada ao LED pode ser matematicamente representado pela regressão linear do gráfico dado na folha de especificações, como expressa (9)[6].

$$F(I_f) = d_o + d_1 I_f \quad (9)$$

Em (9) d_o é o coeficiente linear do fluxo luminoso em função da corrente direta, que é normalmente igual à zero, garantindo que o fluxo luminoso seja nulo quando a corrente direta também for nula. O coeficiente d_1 representa o aumento do fluxo luminoso devido ao acréscimo da corrente direta e normalmente é maior ou igual à unidade.

Esses coeficientes são utilizados para descrever o comportamento do fluxo luminoso dos LEDs. Como o fluxo é uma função de duas variáveis (T_j e I_f), matematicamente pode-se interpretá-las com efeitos individuais, considerando a temperatura de referência (T_o) e a corrente de referência (I_{fo}), ambas fornecidas pelo fabricante. Portanto, o fluxo

luminoso total (F_i) é dado pelo produto de ambos os efeitos, como mostra (10)[6].

$$F_i(T_j, I_f) = nF_o (c_o + c_1 T_j) (d_o + d_1 I_f) \quad (10)$$

Considerando o sistema térmico ao qual o LED está sujeito, pode-se substituir (5),(6) e (7) em (10), resultando em (11).

$$F_i = nF_o \times \left\{ c_o + c_1 \left[T_a + R_{ja} \frac{I_f}{I_{fo}} k_h \frac{V_o + R_s \frac{I_f}{I_{fo}} + k_v (T_a - T_o)}{1 - \frac{I_f}{I_{fo}} k_h k_v R_{ja}} \right] \right\} \left[d_o + d_1 \frac{I_f}{I_{fo}} \right] \quad (11)$$

Onde:

$$R_{ja} = (R_{jc} + nR_{hs}) \quad (12)$$

Algumas observações importantes podem ser feitas a respeito de (11). Esta expressão relata o fluxo luminoso total (F_i) em função da corrente direta (I_f) e da temperatura da junção, como consequência das resistências térmicas R_{jc} e R_{hs} . É uma expressão que integra os aspectos elétricos, térmicos e fotométricos de um sistema de iluminação empregando LEDs.

Ao representar graficamente (11), tem-se o comportamento apresentado na Figura 2, que representa a curva típica do fluxo luminoso em função da corrente direta.

Considerando que o fluxo luminoso é apenas dependente da corrente direta do LED e que a eficácia quântica é de 100%, ou seja, todas as recombinações elétron-lacuna são radiativas, o fluxo luminoso seria linear e diretamente proporcional à corrente, uma vez que toda recombinação geraria apenas fótons.

Entretanto, a eficácia diminui com o aumento da corrente, ocasionando um decréscimo no fluxo luminoso total gerado pelo sistema de iluminação. Este efeito é representado do ponto “a” até o ponto “b”. Se a corrente direta continuar aumentando, e o sistema térmico não for suficiente para extrair o calor da junção, o fluxo luminoso diminuirá abruptamente, representado pelo comportamento do ponto “b” ao ponto “c”.

Em outras palavras, enquanto a corrente direta apresenta valores reduzidos, a eficácia é alta e o fluxo cresce linearmente com a corrente. A partir do momento em que a corrente aumenta a ponto do sistema térmico não ser mais eficiente, o fluxo luminoso começa a diminuir, apresentando comportamento indesejável para o sistema.

O ponto de maior interesse nesta curva é o ponto “b” onde o fluxo luminoso alcança seu valor máximo em virtude das características térmicas do sistema. Assim, é possível dimensionar o sistema térmico de forma que o LED seja alimentado com a corrente capaz de gerar o máximo fluxo.

A corrente que gera o máximo fluxo luminoso, denominada aqui por corrente ótima (I_{fopt}), pode ser encontrada igualando a zero a derivada do fluxo luminoso em função da corrente direta, $dF_i/dI_f = 0$ e isolando a variável que representa a corrente direta (I_f).

O valor de I_{fopt} é dependente dos parâmetros térmicos do sistema, em virtude da dinâmica que existe na dissipação

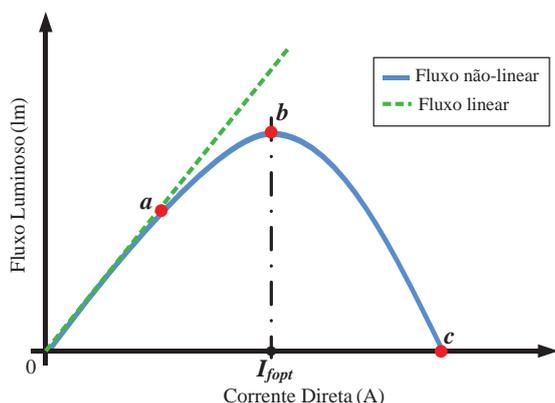


Fig. 2. Curva típica do fluxo luminoso em função da corrente direta.

térmica, representada por R_{jc} , R_{hs} e T_a em (11). Quando a dissipação térmica aumenta, ou seja, as resistências térmicas e a temperatura ambiente diminuem, o fluxo luminoso aumenta e I_{fopt} tem um valor elevado. O inverso também é válido, quando a dissipação térmica diminui, ou seja, as resistências térmicas e a temperatura ambiente aumentam, o fluxo luminoso diminui, e um decréscimo ocorre em I_{fopt} . Esta dinâmica é ilustrada na Figura 3.

O comportamento apresentado em função da dissipação térmica pode fazer com que o ponto de máximo fluxo não ocorra quando o LED é operado com a corrente nominal, devido ao dimensionamento equivocado do dissipador de calor ou elevação na temperatura ambiente (ponto A).

A operação do LED com I_{fopt} menor que a corrente nominal eleva a eficácia luminosa do sistema, desde que o sistema térmico esteja corretamente dimensionado. No entanto, o número de LEDs deve ser elevado no intuito de se alcançar o fluxo luminoso desejado, visto que o potencial luminoso oferecido pelo LED não é totalmente utilizado.

Por outro lado, operar o LED com I_{fopt} acima da corrente nominal (I_{fnom}) não representa uma boa alternativa, pois devido ao aquecimento e à alta densidade de corrente, o dispositivo pode ter um decréscimo em sua vida útil. Para evitar o aquecimento deve-se aumentar o volume do dissipador, no entanto, o aumento no fluxo luminoso pela operação com I_{fopt} acima da corrente nominal não justifica o aumento no volume e no custo do dissipador (ponto C).

A operação com I_{fopt} igual a I_{fnom} representa uma boa alternativa (ponto B). Desta forma, acontece a maximização no desempenho do LED, pois é extraído do dispositivo o máximo fluxo luminoso. Isso acontece devido à utilização de um dissipador de volume apropriado, que manterá a junção em uma temperatura segura, atingindo a vida útil especificada pelo fabricante, o que proporciona uma boa relação entre o fluxo luminoso e volume do dissipador.

Considerando a operação na corrente nominal, é necessário dimensionar o sistema térmico de forma a obter o valor da resistência térmica do dissipador que deve ser utilizado, para que assim, o ponto de máximo fluxo ocorra com corrente nominal do dispositivo.

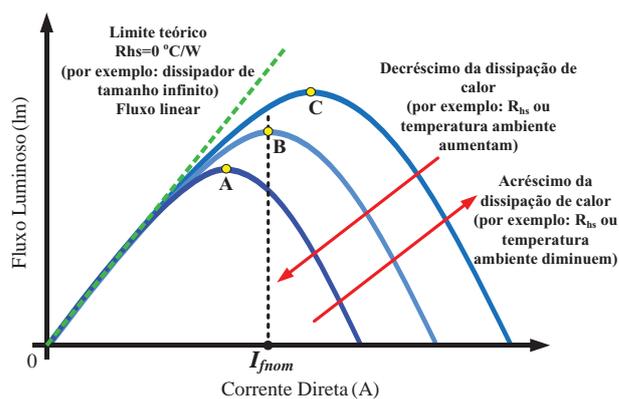


Fig. 3. Fluxo luminoso em função da dinâmica térmica.

No entanto, em virtude das variações da temperatura ambiente, o sistema deve ser projetado para que o máximo fluxo ocorra com o pior caso de temperatura ambiente. Assim, quando a temperatura ambiente diminui, o sistema entrará na região linear de fluxo luminoso, apresentando apenas uma pequena redução em seu valor, porém aumentando a eficácia luminosa.

IV. COMPROVAÇÃO DA METODOLOGIA DE PROJETO ELETROTÉRMICO

Construíram-se módulos de LEDs que foram utilizados em diferentes ensaios. Os resultados experimentais destes ensaios são apresentados em comparação com resultados teóricos e de simulação para avaliação da metodologia.

As simulações realizadas utilizaram o método de elementos finitos (MEF) que é uma ferramenta matemática e computacional útil na análise de sistemas térmicos [35]. Neste estudo os módulos de LEDs foram desenhados e caracterizados de acordo com suas dimensões e composição material. O módulo foi dividido em elementos finitos formando uma malha a qual foi simulada considerando a fluidodinâmica computacional (CFD) para assim verificar a transferência de calor existente no módulo de LEDs.

Os resultados experimentais foram obtidos com o auxílio de uma plataforma de testes como mostra o diagrama da Figura 4. Os experimentos realizados consistem na verificação e adequação da temperatura ambiente do laboratório de testes. O módulo de LEDs foi inserido na esfera integradora e a corrente direta foi aplicada aos dispositivos. Um tempo de transitório térmico foi necessário até que a temperatura do sistema estabilizasse, para medição das variáveis de interesse. A medida da temperatura foi obtida com auxílio de um termopar fixado no dissipador. A tensão foi medida diretamente pelo valor fornecido pela fonte de corrente.

A avaliação dos erros dos ensaios foi realizada em relação ao ponto de operação nominal, com corrente $I_f=0,7A$, considerando que $Erro\%=[(V_{real}-V_{teórico})/(V_{real})]*100\%$. Os valores dos pontos avaliados estão na Tabela II.

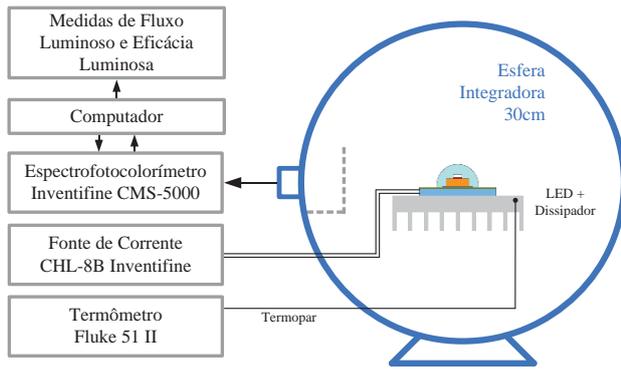


Fig. 4. Plataforma de testes para comprovação da metodologia.

TABELA I

Coefficientes característicos LED LXML-PWN1

Coefficiente	V_o (V)	R_s (Ω)	c_0	c_1	d_0	d_1
Valor	2,73344	0,66403	1,0446	-0,0016	0	1,9145
Coefficiente	k_v (V/ $^{\circ}$ C)	k_h	R_{jc} ($^{\circ}$ C/W)	F_o (lm)	I_{fo} (A)	
Valor	-0,002	0,85	10	100	0,35	

A. *Ensaio 1: LED Luxeon Rebel disposto sobre um dissipador de calor com $R_{hs}=3,72^{\circ}$ C/W e $T_a=25^{\circ}$ C*

Seis LEDs Luxeon Rebel[®] LXML-PWN1 ligados em série foram dispostos sobre um dissipador de calor com $R_{hs}=3,72^{\circ}$ C/W e com $T_a=25^{\circ}$ C. A caracterização do LED

foi realizada através da regressão linear das curvas ($V_f \times I_f$), ($F \times I_f$) e ($F \times T_j$) fornecidas pelo fabricante na folha de especificações [36]. Os coeficientes obtidos pela regressão linear são mostrados na Tabela I.

Os gráficos de fluxo e eficácia luminosa em função da corrente direta, teóricos e práticos, são apresentados nas Figuras 5 e 6, respectivamente. O erro encontrado entre o valor calculado e o medido foi de -5,47% para o fluxo e de -4,27% para a eficácia luminosa.

Os resultados relacionados à temperatura da junção e do dissipador são mostrados nas Figuras 7 e 8, onde foi encontrado um erro de -9,09% entre a temperatura da junção calculada e a estimada, e um erro de -8,19% entre a temperatura do dissipador calculada e a medida. A tensão direta obtida matematicamente por (7) foi de 3,08 V e experimentalmente 3,10 V, apresentando um erro de 0,64%.

B. *Ensaio 2: LED Luxeon Rebel disposto sobre um dissipador de calor com $R_{hs}=3,72^{\circ}$ C/W e $T_a=30^{\circ}$ C*

A temperatura ambiente é um parâmetro que influencia significativamente no desempenho do sistema de iluminação, principalmente por ser uma variável independente e de difícil controle. Como forma de verificação da influência da temperatura ambiente no desempenho dos LEDs, realizou-se novamente o ensaio 1, porém, com temperatura ambiente de 30°C. Esses resultados são mostrados nas Figuras 5, 6, 7 e 8.

O erro encontrado para o fluxo e para a eficácia luminosa foi de -7,5% e -4,89%, respectivamente, entre os valores calculados e medidos. Já para a temperatura da junção e do dissipador o erro foi de -6,84% e -5,97% respectivamente. Observa-se que ocorre uma redução no fluxo luminoso de aproximadamente 3% devido à elevação da temperatura ambiente de 25 °C para 30 °C.

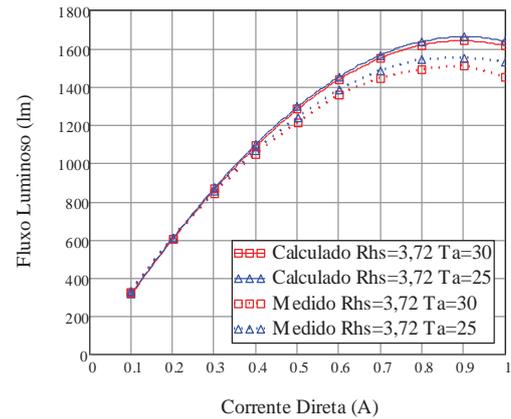


Fig. 5. Fluxo luminoso x Corrente direta no ensaio 1 e 2.

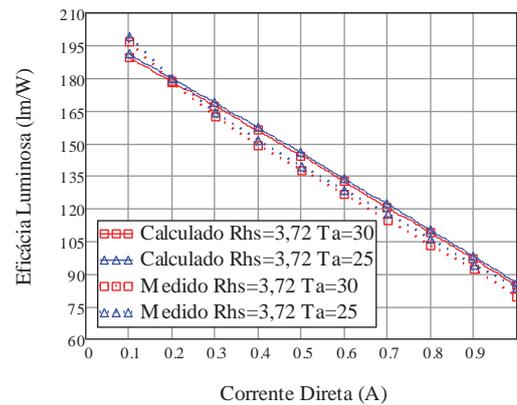


Fig. 6. Eficácia luminosa x Corrente direta no ensaio 1 e 2.

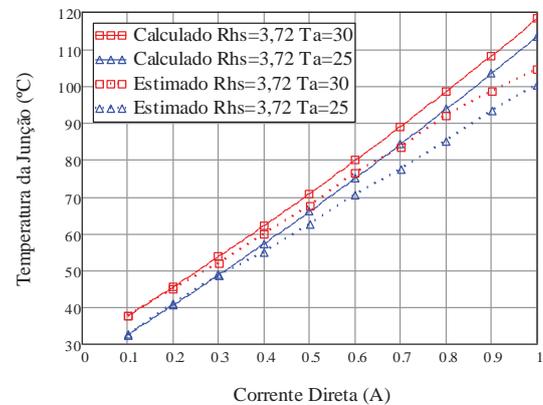


Fig. 7. Temperatura da junção x Corrente direta no ensaio 1 e 2.

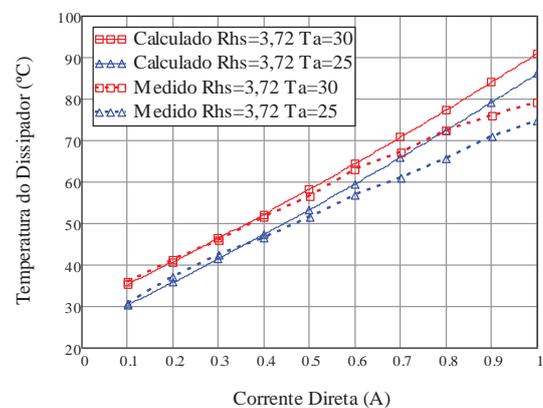


Fig. 8. Temp. do Dissipador x Corrente direta no ensaio 1 e 2.

A simulação utilizando o MEF é apresentada na Figura 9, e o gradiente térmico obtido experimentalmente é mostrado na Figura 10. Existe um erro de -5,97% entre o valor medido com o termopar (67°C) e o valor obtido matematicamente (71°C). O ponto de medição da T_{hs} com o termopar está indicado nas Figuras 9 e 15.

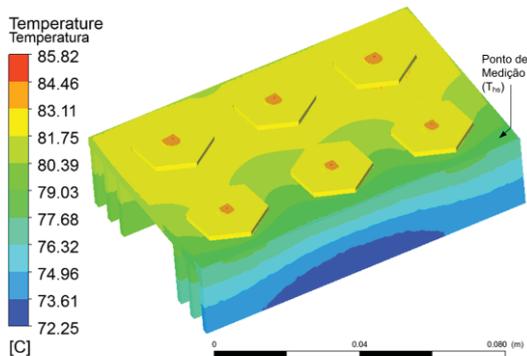


Fig. 9. Simulação com o MEF para $T_a=30^\circ\text{C}$, $I_f=0,7\text{A}$ e $R_{hs}=3,72^\circ\text{C/W}$.

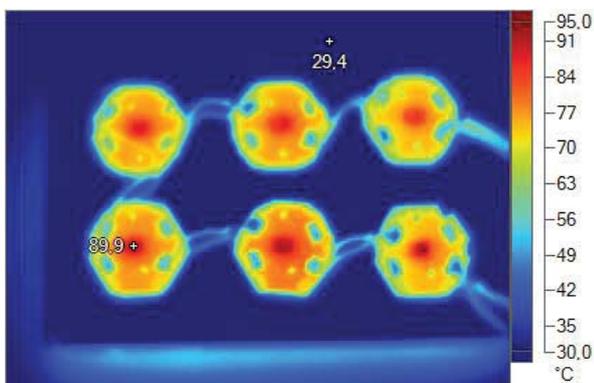


Fig. 10. Gradiente térmico experimental para $T_a=30^\circ\text{C}$, $I_f=0,7\text{A}$ e $R_{hs}=3,72^\circ\text{C/W}$.

C. Ensaio 3: LED Luxeon Rebel disposto sobre um dissipador de calor com $R_{hs}=4,39^\circ\text{C/W}$ e $T_a=25^\circ\text{C}$

Neste experimento o objetivo é verificar a influência da resistência térmica do dissipador no comportamento do fluxo luminoso, por esta razão foram mantidos os seis LEDs Luxeon Rebel LXML-PWN1 dos ensaios anteriores, com características descritas na Tabela I, porém foi modificada a resistência térmica do dissipador, que para esse caso é $4,39^\circ\text{C/W}$, operando em uma temperatura ambiente de 25°C .

Os resultados experimentais obtidos são comparados com os calculados nas Figuras 11, 12, 13 e 14. O erro encontrado entre os resultados teóricos e práticos foi -3,34% para o fluxo e 1,29% para a eficácia luminosa. Já para a temperatura da junção e do dissipador, o erro foi de -9,87% e 8,95% respectivamente. Foi perceptível uma redução no fluxo luminoso de -4,87% devido à elevação da resistência térmica do dissipador.

D. Ensaio 4: LED Luxeon Rebel disposto sobre um dissipador de calor com $R_{hs}=4,39^\circ\text{C/W}$ e $T_a=30^\circ\text{C}$

Elevou-se a temperatura ambiente para 30°C . O erro observado entre a teoria e a prática foi de -5,24% para o fluxo luminoso, 2,39% para a eficácia luminosa, -4,59% para a temperatura da junção e -0,90% para a temperatura do dissipador. Estes resultados são apresentados nas Figuras 11, 12, 13 e 14.

Observando a Figura 11 percebe-se que o ponto de máximo fluxo experimental ocorreu na corrente nominal do LED, (0,7 A). Isso evidencia que mesmo que o dimensionamento do dissipador seja feito corretamente, a temperatura ambiente afetará a reposta do fluxo luminoso. Em virtude disso, deve-se projetar o sistema para que no pior caso de temperatura ambiente o fluxo luminoso máximo ocorra com a corrente nominal do LED. Dessa forma, o LED irá operar em uma região da curva próxima ou igual ao ponto de máximo fluxo, maximizando seu desempenho.

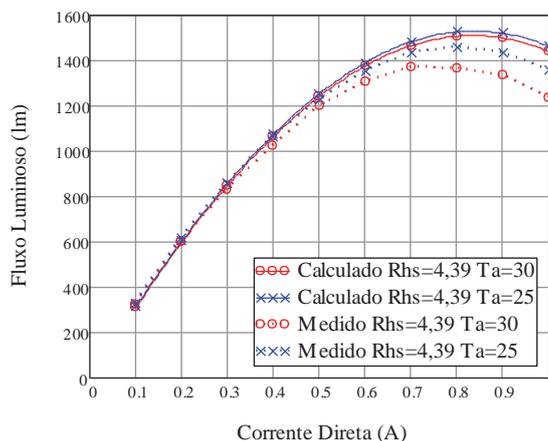


Fig. 11. Fluxo luminoso x Corrente direta no ensaio 3 e 4.

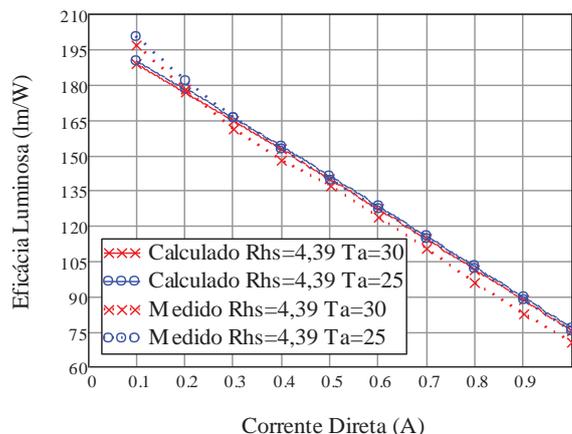


Fig. 12. Eficácia luminosa x Corrente direta no ensaio 3 e 4.

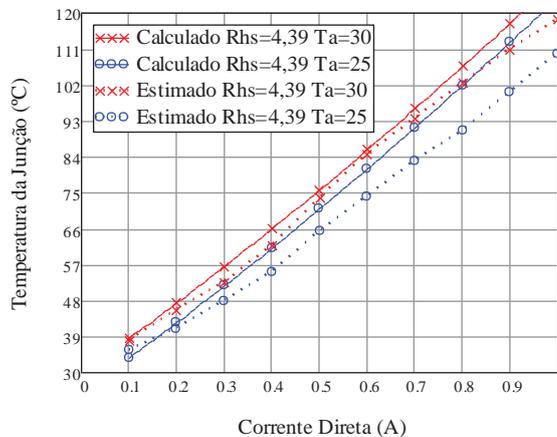


Fig. 13. Temperatura da Junção x Corrente direta no ensaio 3 e 4.

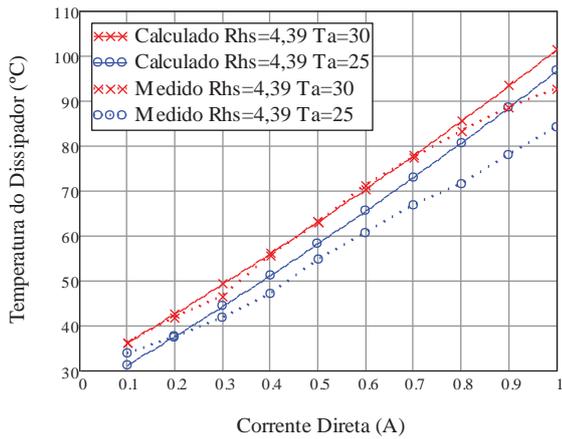


Fig. 14. Temp. do Dissipador x Corrente direta no ensaio 3 e 4.

A simulação com o MEF também foi realizada para o ensaio 2 e é comparada com o resultado obtido experimentalmente nas Figuras 15 e 16. Observa-se um erro de aproximadamente 0,43% entre a temperatura da junção simulada e estimada pelo termovisor. A visualização da temperatura do dissipador nos resultados experimentais obtidos com o termovisor, pode parecer errada, isso se explica devido à diferença de emissividade dos LEDs em relação ao alumínio, o que causa discrepâncias nas imagens térmicas. No entanto, como o objetivo é estimar a temperatura da junção, o método de comprovação empírica através do termovisor se torna válido.

A Tabela II apresenta um resumo comparativo dos quatro ensaios realizados. O cálculo do erro foi realizado entre os valores medidos e calculados.

TABELA II
Comparativo dos resultados para os quatro ensaios realizados com ponto de operação em 0,7A

Ensaio	Temperatura Ambiente (°C)	Dissipador / Resistência Térmica	Fluxo Luminoso			Eficácia Luminosa			Temperatura da Junção				Temperatura do Dissipador			
			Calculado (lm)	Medido (lm)	Erro (%)	Calculado (lm/W)	Medido (lm/W)	Erro (%)	Calculado (°C)	Estimado (°C)	Simulado (°C)	Erro (%)	Calculado (°C)	Medido (°C)	Simulado (°C)	Erro (%)
1	25	Alumínio Polido $R_{hs} = 3,72 \text{ } ^\circ\text{C/W}$	1564	1482,8	-5,47	122	117	-4,27	84	77	78,89	-9,09	66	61	71,29	-8,19
2	30	Alumínio Polido $R_{hs} = 3,72 \text{ } ^\circ\text{C/W}$	1548	1440	-7,5	120	114,4	-4,89	89	83,3	85,82	-6,84	71	67	82,67	-5,97
3	25	Alumínio Polido $R_{hs} = 4,39 \text{ } ^\circ\text{C/W}$	1482	1434	-3,34	114	115,5	1,29	91,2	83	88,16	-9,87	73	67	80,6	-8,95
4	30	Alumínio Polido $R_{hs} = 4,39 \text{ } ^\circ\text{C/W}$	1445	1373	-5,24	110	112,7	2,39	97,8	93,5	90,8	-4,59	78	77,3	82,67	-0,90

V. CONCLUSÕES

Foi proposta uma metodologia de projeto eletrotérmico de LEDs. Inicialmente realizou-se uma abordagem das interações existentes entre os parâmetros que descrevem o comportamento elétrico, térmico e fotométrico dos LEDs. Para integrar os domínios elétrico e térmico do sistema, um modelo eletrotérmico foi proposto. Este modelo realiza a integração dos domínios térmico e elétrico utilizando fontes dependentes. Com base nesse modelo, uma abordagem relacionada aos aspectos fotométricos foi realizada destacando o fenômeno da queda de eficiência, responsável

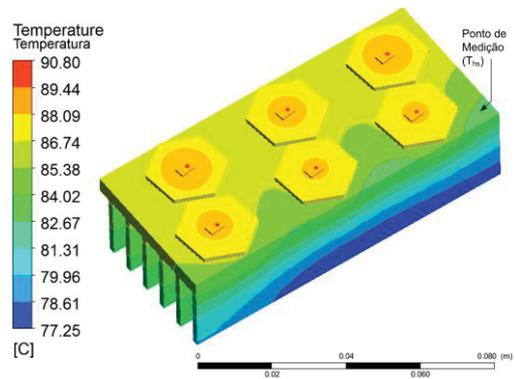


Fig. 15. Simulação com o MEF para $T_a=30^\circ\text{C}$, $I_f=0,7\text{A}$ e $R_{hs}=4,39^\circ\text{C/W}$.

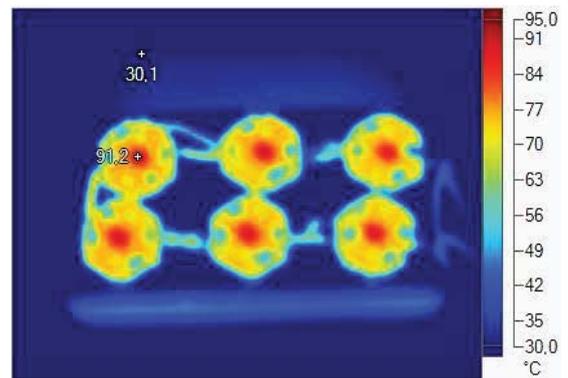


Fig. 16. Gradiente térmico experimental para para $T_a=30^\circ\text{C}$, $I_f=0,7\text{A}$ e $R_{hs}=3,72^\circ\text{C/W}$.

pela redução do fluxo luminoso em função da temperatura de operação do LED.

Para descrever matematicamente o comportamento fotométrico do LED em função da corrente e da temperatura, foi proposta a regressão linear como método para obtenção de coeficientes, que quando aplicados nas equações matemáticas, proporcionam gráficos que descrevem o comportamento do sistema de iluminação.

Entre os gráficos destacou-se o comportamento parabólico do fluxo luminoso em função da corrente e da temperatura, o qual apresenta um ponto de máximo fluxo. Com a determinação da corrente em que o máximo fluxo luminoso ocorre, é possível dimensionar o dissipador de forma que o

sistema de iluminação opere com o máximo fluxo que o LED pode proporcionar para um dado sistema térmico. A metodologia apresenta a corrente direta como variável independente, sendo útil para o projeto de circuitos eletrônicos para o acionamento de LEDs [4, 37].

Como forma de comprovação da metodologia proposta, quatro diferentes situações foram estudadas. Os resultados teóricos foram comparados com simulações pelo MEF e com resultados experimentais. Os erros encontrados são justificados pela consideração de parâmetros constantes como: k_v , k_h , R_{jc} e R_{hs} que também variam com a temperatura.

Entretanto, embora o modelo utilizado seja simplificado, os resultados teóricos obtidos são suficientemente precisos, proporcionando bons indicativos para o desenvolvimento de sistemas de iluminação que empregam LEDs.

REFERÊNCIAS

- [1] D. Gacio, J. Cardesin, E. L. Corominas, J. M. Alonso, M. Dalla-Costa, and A. J. Calleja, "Comparison Among Power LEDs for Automotive Lighting Applications," in *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2008, pp. 1-5.
- [2] J. Bielecki, A. S. Jwania, F. El Khatib, and T. Poorman, "Thermal Considerations for LED Components in an Automotive Lamp," in *23th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, 2007, pp. 37-43.
- [3] C. Wei-Hao, C. Tsung-Lin, H. Cheng-Nan, Y. Shin-Yueh, and C. Kuo-Ning, "Analysis of Thermal and Luminous Performance of MR-16 LED Lighting Module," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 33, pp. 713-721, 2010.
- [4] M. R. C. Rafael Adaime Pinto, Tiago Bandeira Marchesan, Alexandre Campos, Ricardo Nederson do Prado. (2009) Lâmpada compacta empregando LEDs. *Eletrônica de Potência*. 133-140.
- [5] Z. Jianmin and Y. Wei, "Experimental investigation on the performance characteristics of white LEDs used in illumination application," in *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2007, pp. 1436-1440.
- [6] C. Biber, "LED Light Emission as a Function of Thermal Conditions," in *24th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, 2008, pp. 180-184.
- [7] V. C. Bender, O. Iaronka, M. A. Dalla Costa, R. N. do Prado, and T. B. Marchesan, "An optimized methodology for LED lighting systems designers," in *IEEE Industry Applic. Society Annual Meeting*, 2012.
- [8] S. Y. Hui and 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.
- [9] S. Y. R. Hui, H. T. Chen, and X. H. Tao, "An Extended Photoelectrothermal Theory for LED Systems: A Tutorial From Device Characteristic to System Design for General Lighting," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, pp. 4571-4583, Nov 2012.
- [10] X. Tao and S. Y. R. Hui, "A general photo-electro-thermo-temporal theory for light-emitting diode (LED) systems," in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2010, pp. 184-191.
- [11] T. Xuehui and S. Y. R. Hui, "Dynamic Photoelectrothermal Theory for Light-Emitting Diode Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, pp. 1751-1759, 2012.
- [12] L. Lei, Y. Daoguo, G. Q. Zhang, Y. Zhi, H. Fengze, and L. Dongjing, "Thermal performance analysis of photoelectric parameters on high-power LEDs packaging modules," in *12th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems*, 2011, pp. 1-5.
- [13] E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes*, 1th ed. New York: Cambridge University Press, 2003.
- [14] E. M. Sá, "Estudo de Estruturas de reatores eletrônicos para LEDs de Iluminação," Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.
- [15] P. Jeong and C. C. Lee, "An electrical model with junction temperature for light-emitting diodes and the impact on conversion efficiency," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 26, pp. 308-310, 2005.
- [16] E. M. Sa, F. L. M. Antunes, and A. J. Perin, "Junction Temperature Estimation for High Power Light-Emitting Diodes," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2007, pp. 3030-3035.
- [17] D. Gacio, J. M. Alonso, J. Garcia, M. S. Perdigao, E. Saraiva, and F. E. Bisogno, "Effects of the junction temperature on the dynamic resistance of white LEDs," in *27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2012, pp. 1708-1715.
- [18] Y. Xi and E. F. Schubert, "Junction-temperature measurements in GaN UV light-emitting diodes using the diode forward voltage," in *IEEE Lester Eastman Conf. on High Performance Devices*, 2004, pp. 84-89.
- [19] G. Farkas, S. Haque, F. Wall, P. S. Martin, A. Poppe, Q. van Voorst Vader, and G. Bogner, "Electric and thermal transient effects in high power optical devices," in *20th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, 2004, pp. 168-176.
- [20] P. Baureis, "Compact modeling of electrical, thermal and optical LED behavior," in *35th European SS Device Res. Conf.*, 2005, pp. 145-148.
- [21] Y. Lianqiao, H. Jianzheng, and S. Moo Whan, "Dynamic Thermal Analysis of High-Power LEDs at Pulse Conditions," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 29, pp. 863-866, 2008.
- [22] M. Zbroszczyk, G. A. Smolyakov, M. Osinski, and M. Turowski, "Electrical-thermal-optical equivalent circuit modeling of vertical-cavity surface-emitting lasers for package-level simulation," in *13th IEEE Lasers and Electro-Optics Soc. Annual Meet.* 2000, pp. 671-672.
- [23] P. S. Almeida, G. Soares, Pinto D. P., Braga H. A. C., "Integrated SEPIC Buck-Boost Converter as an Off-line LED Driver without Electrolytic Capacitors," in *38th*

Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2012.

- [24] Y. X. Qin, D. Y. Lin, and S. Y. R. Hui, "A Simple Method for Comparative Study on the Thermal Performance of Light Emitting Diodes (LED) and Fluorescent Lamps," in *24th IEEE Applied Power Electronics Conf. and Exposition*, 2009, pp. 152-158.
- [25] H. T. Chen, X. H. Tao, and S. Y. R. Hui, "Estimation of Optical Power and Heat-Dissipation Coefficient for the Photo-Electro-Thermal Theory for LED Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, pp. 2176-2183, 2012.
- [26] Y. X. S. Chhajer, Y.-L. Li, Th. Gessmann, E.F. Schubert, "Influence of junction temperature on chromaticity and color-rendering properties of trichromatic white-light sources based on light-emitting diodes," *Journal of Applied Physics*, vol. 97, 2005.
- [27] C. Rodrigues, P. Barbosa, H. Braga. (2012) Electronic ballast for HPS and HPMV lamps testing dimming mode. *Eletrônica de Potência*. 632-640.
- [28] M. F. da Silva, J. Fraytag, M. Schlittler, T. B. Marchesan, M. A. Dalla Costa, J. M. Alonso, R. N. do Prado. (2012) Análise e projeto da topologia integrada SEPIC meia ponte com controle de fluxo luminoso para o acionamento de lâmpadas fluorescentes sem eletrodos. *Eletrônica de Potência*. 717-729.
- [29] M.H. Kim, M. F. Schubert, Q. Dai, J. K. Kim, E. F. Schubert, J. Piprek, and Y. Park, "Origin of efficiency droop in GaN-based light-emitting diodes," *Applied Physics Letters*, vol 91, pp.183507-183507-3, 2007.
- [30] N. F. Gardner, G. O. Muller, Y. C. Shen, G. Chen, S. Watanabe, W. Gotz, and M. R. Krames, "Blue-emitting InGaN GaN double-heterostructure light-emitting diodes reaching maximum quantum efficiency above 200A/cm²," *Applied Physics Letters*, vol. 91, 2007.
- [31] L. Yun-Li, H. Yi-Ru, and L. Yu-Hung, "Investigation of Efficiency Droop Behaviors of InGaN/GaN Multiple-Quantum-Well LEDs With Various Well Thicknesses," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 15, pp. 1128-1131, 2009.
- [32] A. Laubsch, M. Sabathil, J. Baur, M. Peter, and B. Hahn, "High-Power and High-Efficiency InGaN-Based Light Emitters," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 57, pp. 79-87, 2010.
- [33] D. Saguatti, L. Bidinelli, G. Verzellesi, M. Meneghini, G. Meneghesso, E. Zanoni, R. Butendeich, and B. Hahn, "Investigation of Efficiency-Droop Mechanisms in Multi-Quantum-Well InGaN/GaN Blue Light-Emitting Diodes," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 59, pp.1402-1409, 2012.
- [34] J. Garcia, M. A. Dalla-Costa, J. Cardesin, J. M. Alonso, and M. Rico-Secades, "Dimming of High-Brightness LEDs by Means of Luminous Flux Thermal Estimation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, pp. 1107-1114, 2009.
- [35] R. Lewis, P. Nithiarasu, K. Seetharamu, *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*. Chichester, England: John Wiley & Sons, 2004.
- [36] P. Lumileds. (2011, 17th May). *Luxeon rebel General Purpose White Portfolio - Technical Datasheet DS64*. Available: www.philipslumileds.com/pdfs/DS64.pdf
- [37] L. Schuch, M. A. Dalla Costa C. Rech, L. Michels, G. Costa, A. Santos. (2011) Sistema autônomo de iluminação pública de alta eficiência baseado em energia solar e LEDs. *Eletrônica de Potência*. 17-27.

DADOS BIOGRÁFICOS

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, circuitos eletrônicos para acionamento de diodos emissores de luz (LEDs), gerenciamento térmico de LEDs e diodos orgânicos emissores de luz (OLEDs).

Odirlan Iaronka, nascido em Casca-RS é graduando do Curso Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM - RS. 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 (MEF).

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.

Marco Antônio Dalla Costa, nascido em 03/10/1978 em Santa Maria – RS, possui graduação em Engenharia Elétrica e Mestrado em Eletrônica de Potência pela Universidade Federal de Santa Maria (2002 e 2004, respectivamente). Finalizou o curso de doutorado na Universidad de Oviedo - Espanha em fevereiro de 2008. Desde 2009 é Professor Adjunto na Universidade Federal de Santa Maria. É autor de mais de 30 artigos completos publicados em periódicos internacionais Qualis A1, e mais de 80 artigos científicos publicados em congressos internacionais e nacionais. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: circuitos de alimentação de LEDs, reatores eletrônicos para lâmpadas de descarga, comando auto-oscilante, dimming de lâmpadas de descarga de alta e baixa pressão, ressonâncias acústicas, eficiência de circuitos eletrônicos, fontes alternativas de energia e transformadores de estado sólido.

Ricardo Nederson do Prado, nascido em Itapiranga-SC em 1961. Graduação em Engenharia Elétrica pela UFSM em 1984. Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 1987 e 1993, respectivamente. De 1987 a 1992 trabalhou como Professor Assistente na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Desde 1993 está com a Universidade Federal de Santa Maria, onde atualmente é Professor Associado junto ao Departamento de Processamento de Energia Elétrica. De 2005 a 2006 realizou estágio pós-doutoral junto ao Fraunhofer Institute, Alemanha. É autor de mais de 250 artigos técnicos publicados em congressos e revistas nacionais e internacionais. Seus tópicos de interesse incluem: conversores estáticos, lâmpadas de descarga de alta e baixa pressão, eficiência luminosa, reatores eletrônicos, LEDs como fontes de luz e correção do fator de potência. Dr. Prado é membro fundador da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência, membro da Sociedade Brasileira de Automática e de várias sociedades da IEEE.

Tiago Bandeira Marchesan possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (2003) e doutorado em Engenharia Elétrica (2007) na área de Processamento de Energia pela mesma Universidade. Realizou seu doutorado com estágio na Universidad de Oviedo, Espanha. Atualmente, é Professor Adjunto do curso de Engenharia Elétrica da UFSM. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, tendo atuado como pesquisador do Grupo WEG T&D (Weg Transformadores), professor do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) e da Universidade do Noroeste do Estado do RS (UNIJUI). Possui mais de 12 anos de experiência em pesquisa e desenvolvimento, tendo trabalhado na Academia e na Indústria, bem como em projetos integrados. Possui mais de 60 artigos publicados em congressos e revistas e atua, principalmente, nas seguintes áreas: Transformadores de Potência, Simulações em Elementos Finitos, Fontes Chaveadas e Metodologias e Técnicas de Pesquisa.