

# METODOLOGIA ELETROTÉRMICA APLICADA AO ESTUDO DA CINTILAÇÃO LUMINOSA EM DIODOS EMISSORES DE LUZ

**Nórton Daniel Barth**

Graduando em Engenharia Elétrica UFSM  
nortonbarth@gmail.com

**Vitor Cristiano Bender**

Pós-Graduando em Engenharia Elétrica UFSM  
bender@gedre.ufsm.br

**Tiago Bandeira Marchesan**

Professor/Pesquisador do curso de Engenharia Elétrica UFSM  
tiago@gedre.ufsm.br

**Resumo.** Neste trabalho será apresentado um estudo sobre diodos emissores de luz (LEDs) e suas características através de uma metodologia que relaciona os aspectos térmicos, elétricos e fotométricos. O objetivo do trabalho é mensurar a cintilação luminosa (do inglês flicker) quando é aplicada nos LEDs uma corrente contínua com uma ondulação senoidal, a qual é encontrada na saída de conversores estáticos, que são comumente utilizados para alimentação de LEDs.

**Palavras-chave:** LEDs, Fluxo luminoso, cintilação luminosa.

## 1. INTRODUÇÃO

Elevada eficácia luminosa, longa vida útil, alto índice de reprodução de cores são alguns dos fatores que fazem dos LEDs ótimos candidatos para aplicações na área de iluminação. Estima-se que até 2030, LEDs representarão 74% dos lumens/hora vendidos no mercado de iluminação (DOE 2012).

Os LEDs necessitam de circuitos que controlam sua corrente, uma vez que não podem ser alimentados diretamente pela rede elétrica, esses circuitos em geral são conversores estáticos, como o *Buck-Boost*, *Buck* e o *Boost*, por apresentarem volume

reduzido, baixo custo, alta eficiência e elevado fator de potência.

Conversores apresentam em sua saída uma ondulação de corrente (*ripple*) com o dobro da frequência da rede elétrica (100 e 120Hz), essa oscilação de corrente acaba resultando em uma variação do fluxo luminoso emitido nos LEDs.

## 2. MODELAGEM DE LEDs

LEDs são dispositivos semicondutores que quando diretamente polarizados por uma corrente emitem luz, mas a quantidade de luz emitida é dependente basicamente de fatores elétricos e térmicos.

De acordo com Bender, Barth *et al.* (2013) o fluxo luminoso emitido por LEDs pode ser definido pela Eq(1).

$$\phi_c = nF_0 * \left[ C_0 + C_1 \left( T_a + R_{ja} \frac{I_f}{I_{fo}} k_h \frac{V_o + R_s \frac{I_f}{I_{fo}} + k_v (T_a - T_o)}{1 - \frac{I_f}{I_{fo}} k_h k_v R_{ja}} \right) \right] * d_0 + d_1 I_f f_0 \quad (1)$$

Na equação (1) tem-se: o coeficiente linear do fluxo em função da temperatura ( $C_0$ ), o coeficiente angular do fluxo em função da temperatura ( $C_1$ ), a resistência térmica da junção para o ambiente ( $R_{ja}$ ), onde ( $R_{ja} = R_{jc} + R_{hs} * n$ ), sendo “ $R_{jc}$ ” a

resistência térmica da junção, “n” o numero de LEDs e “R<sub>hs</sub>” a resistência térmica do dissipador. Tem-se o coeficiente de transformação de calor do LED (k<sub>h</sub>), o coeficiente da queda de tensão (k<sub>v</sub>), a temperatura ambiente (T<sub>a</sub>) temperatura de referência dos dados do LED (T<sub>0</sub>), a corrente nominal (I<sub>f0</sub>), um vetor de corrente que varia entre 0A, a máxima corrente suportada pelos LEDs (I<sub>f</sub>), o limiar de tensão necessária para que os LEDs entrem em condução (V<sub>0</sub>), o fluxo luminoso nominal (F<sub>0</sub>), a resistência elétrica série de cada LED (R<sub>s</sub>), o coeficiente linear do fluxo em função da corrente (d<sub>0</sub>) e o coeficiente angular do fluxo em função da temperatura (d<sub>1</sub>), todos estes dados são informados pelo fabricante diretamente, ou obtidos através da regressão linear dos gráficos apresentados no catálogo do LED.

Pela Eq.(1) tem-se que ao variar o volume do dissipador (e consequentemente sua resistência térmica) pode-se obter ganhos no fluxo luminoso como mostrado na Fig. 1.

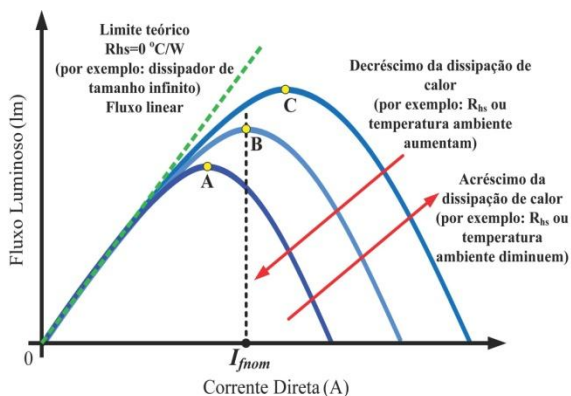


Figura 1. Variação do fluxo causado pela resistência térmica do dissipador

Entretanto a Eq.(1) só é válida quando a corrente que alimenta o LED não possui ondulação, no momento que existe um *ripple* de corrente deve-se fazer alguns ajustes na Eq.(1) devido ao fato que os fatores elétricos variam numa dinâmica maior que os fatores térmicos. O *ripple* de corrente é representado na Fig.(2) onde se tem os valores de corrente máxima (I<sub>max</sub>), média (I<sub>med</sub>) e mínima (I<sub>min</sub>).o que permite o

calculo do *ripple* de corrente percentual, representado pela Eq.(2).

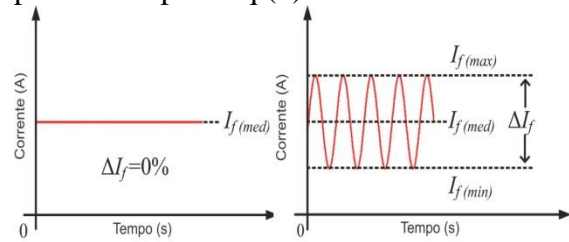


Fig. 2. *Ripple* de corrente

$$\Delta I\% = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\text{med}}} * 100\% \quad (2)$$

O sinal de corrente na saída do conversor pode ser definido pela Eq.(3) e seu valor eficaz pela Eq.(4).

$$I(t) = I_{\text{med}} + \frac{\Delta I\%}{2} I_{\text{med}} \text{sen}(2\pi * t * f) \quad (3)$$

$$I_{\text{ef}} = \sqrt{\int_0^{\frac{1}{f}} \frac{I(t)^2}{\frac{1}{f}} dt} \quad (4)$$

Com esses dados é possível determinar uma equação que represente a resposta do fluxo luminoso com um *ripple* de corrente aciona o LED, como representado pela Eq. (5).

$$F_{\text{din}}(t) = nF_0 * \left[ C_0 + C_1 * \left( T_a + R_{ja} \frac{I_{\text{ef}}}{I_{f0}} k_h \frac{V_0 + R_s \frac{I_{\text{ef}}}{I_{f0}} + k_v(T_a - T_0)}{1 - \frac{I_{\text{ef}}}{I_{f0}} k_h k_v R_{ja}} \right) \right] * d_0 + d_1 I_{\text{ef}} \quad (5)$$

De acordo com (Bender, Barth *et al.*, 2012) a eficácia luminosa dos LEDs decresce rapidamente com valores de *ripple* superiores a 100%, além de que o aumento do valor eficaz resulta em maiores perdas térmicas.

Uma maneira de se mensurar a cintilação luminosa é pela equação de contraste de Michelson, também conhecido como flicker percentual (Eq.(6)), onde o fluxo máximo (F<sub>max</sub>) e o mínimo (F<sub>min</sub>) (Lehman, Wilkins *et al.*, 2011).

$$\Delta F\% = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_{\max} + F_{\min}} * 100\% \quad (6)$$

O *flicker* pode causar efeitos danosos ao ser humano, em frequências entre 3Hz e 70Hz pode causar ataques epiléticos em pessoas com epilepsia fotossensível, em frequências entre 70Hz e 165Hz (que é o limiar da percepção humana) o *flicker* torna-se imperceptível entretanto causa dores de cabeça, cansaço e redução do rendimento intelectual das pessoas submetidas a ele. Essa variação de fluxo em determinadas frequência causa efeito estroboscópico (que causa a sensação de que máquinas girantes estejam paradas, girando lentamente ou em casos que a frequência de variação de luz é maior que a da máquina causa a impressão de a máquina esteja girando no sentido contrário) (Wilkins, Veitch *et al.*, 2010).

Ao unir a Eq. 5 com a Eq. 6 e estabelecendo um limite de *ripple* de corrente em 100%, obtêm-se o valor máximo de *flicker* de 50% logo se têm uma relação entre *ripple* e *flicker* representado na Eq. 7.

$$\Delta F\% = 2 * \Delta I\% \quad (7)$$

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Durante os testes experimentais foram utilizadas duas plataformas de teste, uma composta por uma esfera integradora e a outra por um fotodiodo (BPW21R) em conjunto com um circuito amplificador com o propósito de melhorar a precisão dos dados obtidos. Utilizou-se também três dissipadores, ambos com 6 LEDs Philips® Lumileds® Rebel LXML-PWN1 mostrados na Fig. 3.



Figura 3. Dissipadores e suas respectivas resistências térmicas

Os coeficientes construtivos do LED utilizado e os parâmetros elétricos usados durante os ensaios estão representados na tabela 1.

TABELA 1 – Coeficientes LED LXML-PWN1-0100

Coeficiente	V <sub>0</sub> (V)	R <sub>s</sub> (Ω)	c <sub>0</sub>	c <sub>1</sub>	d <sub>0</sub>
Valor	2.7334	0.6640	1.0446	0.0016	0
Coeficiente	k <sub>v</sub> (V/°C)	k <sub>h</sub>	R <sub>jc</sub> (°C/W)	F <sub>0</sub> (lm)	d <sub>1</sub>
Valor	-0.002	0.85	10	100	1.9145
Parâmetros	T <sub>a</sub> (°C)	I <sub>med</sub> (A)	f (Hz)	I <sub>f0</sub> (A)	T <sub>jmax</sub> (°C)
Valor	30	0.7	120	0.35	150

Durante um dos testes foi variado o valor da corrente média com um passo de 100mA, para os três dissipadores. Um tempo suficiente para o sistema entrar em regime térmico foi aguardado para cada nível de corrente, de modo a provar a dependência do fluxo em função da temperatura (consequentemente do dissipador), logo unindo a Eq. 1, com os dados experimentais obtêm-se o gráfico 1.

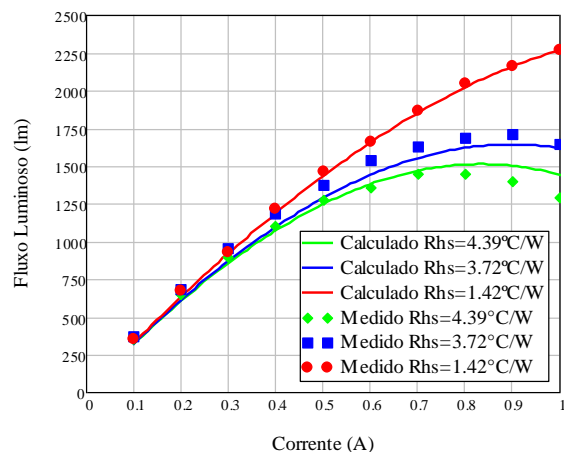


Gráfico 1. Fluxo luminoso estático para diferentes dissipadores com T<sub>a</sub>=30°C

Ao observar o gráfico 1 nota-se um ganho no fluxo luminoso para dissipadores com menor resistência térmica, entretanto essa diminuição acarreta em um aumento considerável do tamanho do dissipador e consequentemente de seu valor.

Outro teste que foi realizado teve como metodologia manter a corrente média constante e variar o *ripple* percentual de

corrente, com isso verificou-se que ao utilizar os dados empregados na Eq. 6 obtêm-se o gráfico 2.

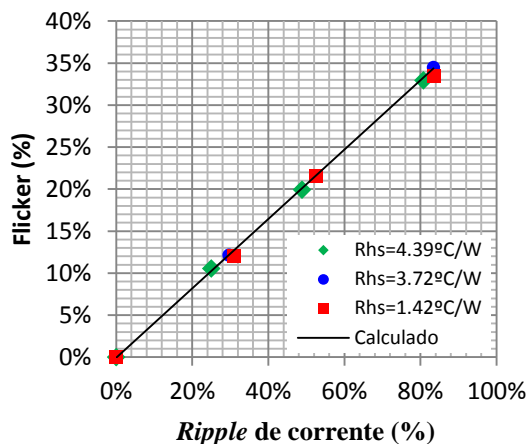


Gráfico 2. *Flicker* versus *ripple* de corrente com  $I_{med}=700mA$

Pelo gráfico 2 verifica-se que o *flicker* é independente de variáveis térmicas ( $R_{hs}$ ,  $T_a$ ) comprovando assim a validade da Eq. 7, sendo que os pequenos erros apresentados são devido a idealização do modelo matemático.

Também foi analisado o caso em que há uma ondulação de corrente fixa e uma variação da corrente média, como demonstrado no gráfico 3.

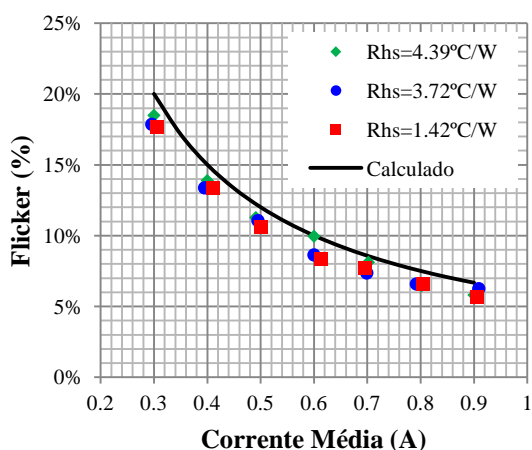


Gráfico 3. *Flicker* versus corrente média

Pelo Gráfico 3 é possível verificar que o *flicker* depende apenas do *ripple* de corrente percentual, pois uma vez que a corrente média é maior, a ondulação percentual

torna-se menor, e conseqüentemente tem-se *flicker* menor.

#### 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho fora apresentado um estudo fotométrico dos LEDs levando em consideração características térmicas e elétricas, bem como conceitos de *flicker* e *ripple* de corrente.

Pode-se verificar a relação entre *flicker* e *ripple* de corrente percentual, assim como as diferenças ocasionadas pela alimentação de um conversor com diferentes níveis de ondulação em sua saída, tornando-se possível o projeto do mesmo que irá alimentar os LEDs levando em consideração o *flicker* que será produzido pela ondulação de saída do conversor.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

BENDER, V. C. et al. Electrothermal Methodology Applied to Flicker Analysis in Off-line LED Systems **IECON**, 2013, *in press*

BENDER, V. C. et al. An optimized methodology for led lighting system designers: A photometric analysis. **IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society**, 2012. 25-28 Oct. 2012. p.4521-4526.

LEHMAN, B. et al. Proposing measures of flicker in the low frequencies for lighting applications. **Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**, 2011 IEEE, 2011. 17-22 Sept. 2011. p.2865-2872.

DOE, Solid-State Lighting Research and Development: Multi-Year Program Plan. United States Department of Energy: 173-177 p. April 2012.

WILKINS, A.; VEITCH, J.; LEHMAN, B. LED lighting flicker and potential health concerns: IEEE standard PAR1789 update. **Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**, 2010 IEEE, 2010. 12-16 Sept. 2010. p.171-178.