

# CONSTRUÇÃO DE UM RADIÔMETRO PARA CARACTERIZAÇÃO DE LEDS

KELLY ABREU\*, GEYDISON DEMETINO\*, JOÃO MOREIRA\*, VITOR L. FILARDI\*, IURI M. PEPE\*

\* *Universidade Federal da Bahia*  
*Rua Barão de Jeremoabo, s/n*  
*Ondina, Salvador Bahia, Brasil*

Emails: kelly.abreusilva@gmail.com, jdemetino@gmail.com, b2.lapo@gmail.com,  
mrfileardi@gmail.com, lapo.if@gmail.com

**Abstract**— This work reports the construction of a LED radiometer for optical characterization. The device design is based on the international standard CIE 127. In order to test the developed instrumentation solution, the irradiance of 5 different wavelengths of LEDs was measured: red (631nm), yellow (587nm), green (530nm), blue (470nm) and violet (398nm). The irradiance values can determine the irradiance potential of each LED. The results showed a huge difference for this physical quantities that can vary from 124 up to 4888  $((W/m^2)/A)$ . Using a goniometer mounted in the LED radiometer input, the light intensity was measured as a function of the angular position. This relation appears due to some design and manufacturing issues. The results are consistent with the expected misalignment between the optical and the geometrical axis, revealing being more severe for the blue and green LEDs and less critical for the red one. A statistical study was made to determine the performance distribution of 116 commercial blue LEDs; the results could be adjusted using a Gaussian curve. The 80 LEDs had regular performance; within the range of one standard deviation; 15 LEDs were below average and 21 exceeded the emitted light intensity criterion.

**Keywords**— LED radiometer, LED irradiance characterization, LED metrology, medical physics and LED

**Resumo**— Este trabalho reporta sobre a construção de um radiômetro para caracterização de LEDs de 3 e 5 mm encapsulados em epóxi, seguindo a norma internacional CIE 127. Para testar a solução de instrumentação desenvolvida, foram caracterizados, em relação à irradiância LEDs de diversos comprimentos de onda: vermelha (631), amarelo (587 nm), verde (530 nm), azul (470nm) e violeta (398 nm). A partir destes dados, foi determinado o potencial de irradiância para cada um dos LEDs, os resultados mostraram uma grande diferença para esta grandeza variando de 124 a 4888  $(W/m^2)/A$ . Com auxílio de um goniômetro, montado na entrada de LED do radiômetro, foi determinada a dependência angular da intensidade do feixe de luz gerado, esta dependência é função de fatores construtivos destes dispositivos. Os resultados são consistentes com a discrepância de alinhamento esperada entre o eixo óptico e o eixo geométrico, sendo mais severa para os LEDs azuis e verdes e menos crítica para os LEDs vermelhos ensaiados. Foi feito o estudo estatístico da distribuição do desempenho de 116 LEDs comerciais, os resultados puderam ser ajustados por uma gaussiana. Dos LEDs ensaiados 80 apresentaram desempenho médio, dentro do intervalo de um desvio, 15 LEDs apresentaram desempenho abaixo da média e 21 superaram a média no critério intensidade de luz emitida.

**Palavras-chave**— Radiômetro para LED, caracterização da irradiância de LEDs, metrologia de LEDs, Física Médica e LED

## 1 Introdução

A eletroluminescência é um fenômeno optrônico que resulta na emissão de luz, como resposta à passagem de corrente elétrica em um semicondutor. Nos diodos emissores de luz a eletroluminescência ocorre quando, em uma junção P-N diretamente polarizada, elétrons do lado N, que acabaram de ultrapassar a barreira de potencial da junção, se recombinam com lacunas do lado P.

Ao longo de décadas, os LED se mantiveram limitados às cores vermelho, amarelo e verde, porém, nos anos 90, no Japão, foram produzidos os primeiros LED azuis, que combinados com os LEDs vermelhos e verdes produziam luz branca, estendendo assim a aplicabilidade dos diodos eletroluminescentes (Nakamura, 1996).

As aplicações de LED, no que se refere à iluminação, se mostram extremamente promissoras, se comparadas com a iluminação clássica, feita com lâmpadas incandescente. O LED branco é considerado como um candidato promissor para a iluminação do futuro (Lourenço, 2010), sendo uma

fonte de luz de alta eficiência e baixo consumo de energia, tendo longa vida útil ( $>30.000$  h). Portanto, não é difícil vislumbrar a substituição da iluminação como conhecemos hoje, que vem se tornando progressivamente obsoleta, diante desta nova tecnologia (Nakamura, 1996). O LED não é apenas usado como dispositivo de iluminação, mas também como dispositivo de comunicação, seja de dados, por fibra ótica, ou comunicação visual por painéis (Nakamura, 1996). Não se pode esquecer das aplicações na área de análise química e médica (Pérez et al., 2008) e (Barolet, 2008), como os tratamentos fotodinâmicos (PDT) (*Photo-dynamic Therapy*) - que consiste na aplicação de um produto fotossensibilizante na pele, por exemplo, o ácido 5-aminolevulínico (ALA), que mantido sob oclusão, penetrará na área do tecido tumoral, nos folículos pilosos e nas glândulas sebáceas, para em seguida, já com o tecido impregnado pela medicação, ser exposto à irradiação luminosa de um LED. Este feixe de luz concentrado e direcionado provoca a destruição seletiva do tecido da área afetada por reação fotoquímica.

Selecionando o comprimento de onda adequado, a luz dos LEDs permite o tratamento do fotoenvelhecimento nos seus variados graus, seja para o rejuvenescimento, para o tratamento de lesões pré-malignas da pele (queratoses actínicas); prevenindo os casos de câncer da pele (carcinoma basocelular) superficiais; ou ainda no tratamento da acne inflamatória (Moreira, 2009).

Os diodos emissores de luz comerciais são fabricados a partir de materiais da família III e V da tabela periódica. Existem também LEDs produzidos a partir dos materiais das famílias II-VI, a exemplo do ZnSe. O conjunto desses materiais semicondutores, que compreende diferentes bandas de energias, é capaz de produzir radiação luminosa entre 200 e 2.500 nm.

Em geral, a capacidade de produzir luz pelos LEDs varia em função da tecnologia de fabricação, do fabricante e mesmo, do lote fabricado. Sendo assim, a irradiância destes dispositivos passa a ser um parâmetro de interesse, seja por questões de uniformidade de painéis de grandes áreas, seja por razões de manutenção, quando se impõe uma troca standard destes dispositivos ou ainda por razões médicas, quando da aplicações de tratamento do tipo PDT.

## 2 Diodo PIN para detecção de luz

O nome PIN é um anagrama que faz referência às regiões P e N do diodo, geralmente de silício, onde foi incorporada uma camada intermediária fracamente dopada, portanto com alta resistividade, dita intrínseca (I). Na polarização direta, lacunas e elétrons são injetados na camada intrínseca I, disso resulta uma certa quantidade média de carga nessa camada, o que possibilita a condução.

Na polarização nula ou inversa, não há injeção de carga e o diodo se comporta como um capacitor em paralelo com a resistência de valor alto, já que a região central (I), deste arranjo, tem grande resistividade. Falando de forma simplificada, o diodo PIN pode se comportar como um quase curto-circuito ou um circuito aberto, em função da polarização (Wang et al., 2004) e (Boylestad and Nashelsky, 1984).

Na polarização reversa a zona de depleção aumenta e os fótons que incidem nos átomos da região intrínseca têm maior probabilidade de criar um par elétron-buraco. A pequena mobilidade desta região dificulta a recombinação do par criado, aumentando a probabilidade que estas cargas cheguem às regiões N e P respectivamente, contribuindo para o aumento da foto-corrente, conforme ilustra a Figura 1 (De Camargo, 2005). Em um diodo a foto-corrente é proporcional ao número de pares criados e, portanto, ao número de fotos que incidem sobre a área ativa da pastilha e da probabilidade destes fótons criarem pares na zona de depleção.



Figura 1: Ilustração da detecção de fótons e geração de pares elétron-buraco em um diodo PIN reversamente polarizado. Fonte: Notas de aula do Centro Universitário Fundação Santo Andre (FSA), Edson B. Ramos Férís e Laércio Alves Nogueira.

## 3 O radiômetro $R^2LED$

O radiômetro para a caracterização de LED apresentado neste trabalho tomou por base as normas internacionais de metrologia de LEDs preconizadas pela CIE 127 de 1997, revisada em 2007 (Hermann, 1998) e (*Handbook of LED Metrology*, 2000). O princípio de funcionamento do radiômetro proposto é simples, neste equipamento o LED a ser caracterizado é posicionado a uma distância fixa, no interior de um duto escuro, de forma que o conjunto fique isolado da luz ambiente (Svilainis and Dumbrava, 2006). No final deste caminho óptico predeterminado, um detector converte fótons em fotoelétrons, a irradiância é então determinada a partir da foto-corrente medida.

Foi usinado, no Laboratório de Propriedade Óticas (LaPO) do Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia (UFBA), um tarugo de poliestireno de 40mm de diâmetros 150 mm de comprimento, além de uma base de fixação e dois mancais de apoio, feitos em perfil de alumínio anodizado, veja 2. O radiômetro recebeu a sigla  $R^2LED$  ou Radiômetro de Referência para LED.



Figura 2: Foto do  $R^2LED$  que foi desenvolvido no LaPO.

Numa das extremidades do cilindro foi montado um suporte capaz de receber um porta LED universal, que permite as montagens não destrutivas dos LEDs de 3 e 5mm, encapsulados em epóxi. Neste suporte é feita a acomodação mecânica e a conexão elétrica do LED em teste, sem que haja necessidade de dobrar, soldar ou crimpar seus terminais, assegurando a integridade do dispositivo. Na Figura 3 é mostrado o diagrama da bancada de teste desenvolvida.

No outro lado do cilindro foi montado um foto-diodo Hamamatsu SM1PD2A, cuja corrente de saída, medida por um multímetro de bancada

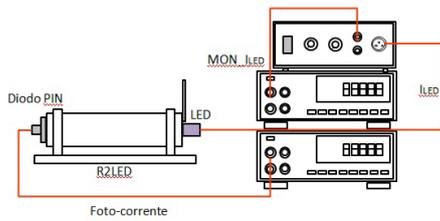


Figura 3: Diagrama de bancada de teste.

Minipa MDM-8146, serve para determinar a intensidade de luz emitida pelos LEDs montados no porta LED, na outra extremidade do cilindro. Na Figura 2 é apresentado o aspecto externo do radiômetro  $R^2LED$ , já a Figura 4 representa a vista de corte do radiômetro. A área ativa do Hamamatsu SM1PD2A é de  $100 \text{ mm}^2$ , como estipula a norma.

A distância efetiva entre o LED e o fotodiodo é exatamente 100 mm, esta distância é mandatória para que a medida da irradiância possa ser feita.

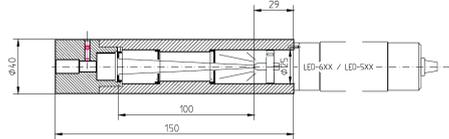


Figura 4: Vista em corte do radiômetro para caracterização de LEDs.

O circuito de polarização dos LEDs foi montado de forma a garantir corrente constante e ajustável, sem atentar contra a integridade dos dispositivos ensaiados. A fonte de corrente constante foi especialmente projetada de forma a garantir uma faixa segura de trabalho entre 3 e 42 mA DC. Uma resistência com precisão de 0.1%, em série com o LED, em teste, cria uma queda de tensão proporcional à corrente de polarização deste diodo eletroluminescente. Esta corrente pode então ser monitorada por um segundo multímetro MDM-8146.

Na fonte de corrente foi utilizado o circuito integrado LM723 na configuração de fonte ajustável de corrente. Esse CI é mais usualmente utilizado em aplicações como: fonte de tensão, regulador de desvio e controlador de temperatura.

O controle da corrente do LED é feito pelo LM723 graças a comparação entre tensão aplicada na entrada não-inversora (pino 5) e a tensão sobre o resistor R2 ligado ao terra e aplicada ao pino 4 (entrada inversora). A tensão aplicada à entrada não-inversora é determinada pelo potenciômetro R3, e será no máximo igual a tensão de referência presente no pino 6 do CI. Essa comparação determina a correção da corrente fornecida pelo pino 10 do LM723, de forma a manter a diferença entre as entradas do comparador sempre igual a zero, ver Figura 5.

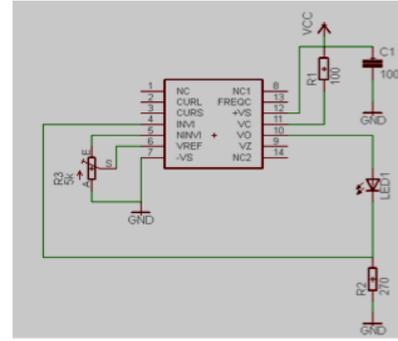


Figura 5: Diagrama de montagem da fonte de corrente para polarização de LEDs.

Existe grande dificuldade em obter detalhes da geometria e da ótica de um LED, seja na literatura, ou mesmo, em se contatando as empresas fabricantes. Um bom exemplo são os dados de homogeneidade e da geometria do cone de iluminação gerado pelos diodos emissores de luz. É importante ressaltar que os contatos elétricos internos, a forma do refletor na parte posterior do diodo e mesmo a posição de ancoramento da pastilha no catodo, interferem na quantidade e na qualidade da luz emitida, veja Figura 6. Para se contrapor a esta dificuldade foi incluído no projeto do  $R^2LED$  um goniômetro, que permite medir e variar a posição angular do LED em teste.

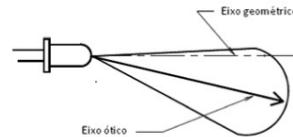


Figura 6: Discrepância entre o eixo óptico e o eixo geométrico observada em LEDs.

## 4 Resultados

Diferente das lâmpadas incandescente, os LEDs apresentam uma relação linear entre a corrente de polarização e o fluxo de fótons gerado e, portanto, com a potência óptica emitida. Isso é verdade, desde que essa potência se mantenha dentro de determinados limites. Sendo assim, o primeiro ensaio do radiômetro serviu para determinar se os limites impostos à corrente de polarização dos LEDs (0.003 a 0.042 A), estes limites devem representar um intervalo dinâmico adequado para o teste destes dispositivos optoeletrônicos.

Nas Figura 7, Figura 8, Figura 9, Figura 10 e Figura 11 é possível visualizar os valores de irradiância, em  $\text{W}/\text{m}^2$ , obtidos para 5 LEDs (vermelho, amarelo, verde, azul e violeta). Nessas mesmas figuras são apresentadas as retas ajustadas e os diferentes coeficientes angulares, que receberam o nome de potencial de irradiância, expressos em  $(\text{W}/\text{m}^2)/\text{A}$ . A irradiância foi determinada por um software desenvolvido no LaPO. Este programa usa a curva de resposta do fotodiodo (sensibilidade  $(\text{A}/\text{W})$  versus o comprimento de onda

(nm), fornecida pelo fabricante (Figura 12)), a foto-corrente gerada pelo fotodiodo ( $\mu A$ ), o comprimento de onda de máxima emissão do LED em teste e a área ativa do fotodiodo para determinar esta grandeza. O espectro de emissão dos LEDs foram obtidos pelo espectrofluorímetro Q798-FIL da Quimis, também desenvolvido pela equipe de engenharia do LaPO, em parceria com a Quimis Aparelhos Científicos LTDA.

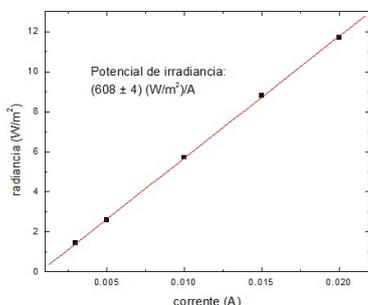


Figura 7: Radiância em função da corrente de polarização de um LED vermelho comercial.

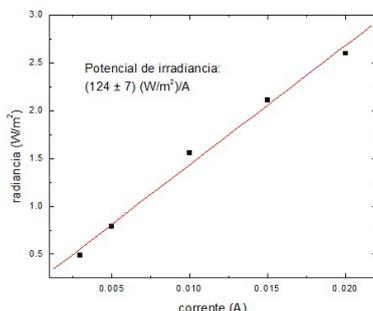


Figura 8: Radiância em função da corrente de polarização de um LED amarelo comercial.

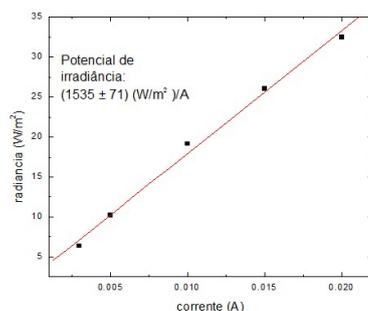


Figura 9: Radiância em função da corrente de polarização de um LED verde comercial.

Apesar de serem todos LEDs comerciais de alto brilho, a diferença entre o potencial de irradiância dos dispositivos testados é marcante, uma explicação para este fato pode ser o tipo de semicondutor usado para conseguir-se uma determinada cor de LED. Ou ainda, o tipo de tecnologia usado na fabricação da pastilha. De qualquer forma, quando do uso de LEDs de diferentes cores numa aplicação que requeira homogeneidade da intensidade de luz emitida, como é o caso do dermatoscópio, é imperativo que seja feita uma com-

pensação na corrente de polarização dos eventuais diferentes foto-emissores usados.

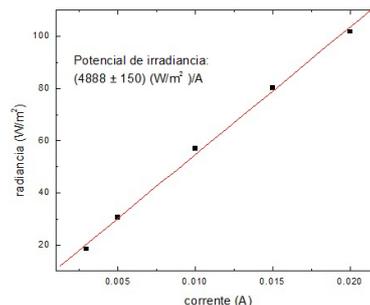


Figura 10: Radiância em função da corrente de polarização de um LED azul comercial.

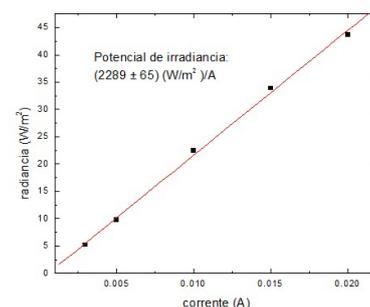


Figura 11: Radiância em função da corrente de polarização de um LED violeta comercial

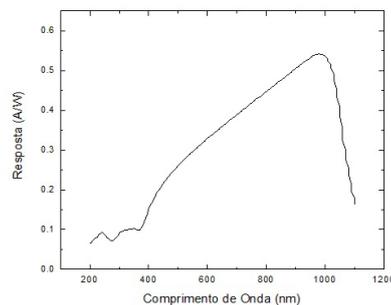


Figura 12: Curva de resposta espectral do diodo Hamamatsu.

A resposta angular dos LEDs testados (foto-corrente versus ângulo de giro do suporte universal) também foi medida com o  $R^2LED$ , graças ao goniômetro montado na extremidade de entrada deste dispositivo, veja Figura 13.



Figura 13: Foto do goniômetro acoplado ao suporte para LED.

Neste ensaio os LEDs foram montados no suporte universal, sempre respeitando o mesmo posicionamento inicial (em relação ao chanfro do encapsulamento epóxi e terminais do LED). Foi então aplicada uma corrente de polarização, mantida constante ao longo do ensaio e finalmente feita a varredura entre  $0^\circ$  e  $720^\circ$  ou duas voltas completas. O giro dos LEDs seguiu passos de  $10^\circ$ , sendo que a cada nova posição era lida a corrente do fotodiodo. A Figura 14 ilustra o resultado obtido. Na Tabela 1 pode-se visualizar então os potenciais de irradiância de cada LED testado e o erro associado. Nesta figura fica evidente a dependência entre a irradiância dos LEDs e o ângulo em que estes dispositivos estão posicionados (Svilainis and Dumbrava, 2006). O máximo de emissão do LED vermelho ocorre para um ângulo de giro de  $340^\circ$ , enquanto que o máximo de emissão do LED azul ocorre no ângulo de  $303^\circ$ . Finalmente o LED verde, apresenta um máximo à  $203^\circ$ , seguido de um máximo secundário em  $336^\circ$ .

Tabela 1: Comprimento de onda do máximo de emissão de 5 diferentes LEDs e seus respectivos potenciais de irradiância.

Cor	Vermelho	Amarelo	Verde	Azul	Violeta
Comprimento de onda (nm)	631	587	530	470	398
Potencial de irradiância e erro $((W/m^2)/A)$	608 $\pm 4$	124 $\pm 7$	1535 $\pm 71$	4888 $\pm 150$	2289 $\pm 65$

Ainda nesta figura, fica evidente que os diferentes dispositivos são mais ou menos afetados pela dependência angular de seus feixes luminosos. Assim, entre o máximo de emissão e o mínimo de emissão do LED azul, observa-se uma variação relativa de 50.4%. Já o LED vermelho apresenta uma variação relativa da intensidade em função do ângulo de 9,4%. Sendo que o LED verde é o que apresenta a maior estabilidade emissiva, com uma variação relativa de somente 2.3%.

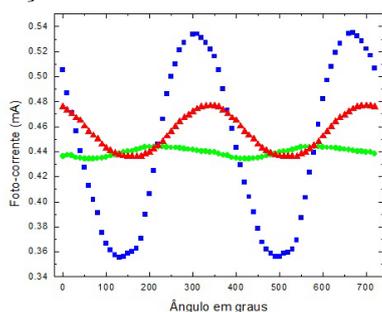


Figura 14: Gráfico da foto-corrente em função do ângulo de giro do porta LED para três diferentes LEDs. A cor da curva corresponde à cor do LED testado.

Na medicina a utilização de LEDs tem se tornando cada vez mais freqüente. A luz dos LEDs aplicada sobre a pele trás benefícios que vêm sendo estudados e comprovados. A luz vermelha possui ação cicatrização e age como antiinflamatório (Rigau et al., 1998) e (Moreira, 2009). Enquanto que a cor azul (470nm) possui ação bac-

tericida e rejuvenescedora. De acordo com alguns estudos, apesar da densidade do fluxo de fótons dos feixes emitidos pelos LEDs ser menor que na luz dos LASERS, na pele, a luz não coerente desses diodos consegue uma boa interação com as células da derme e da epiderme.

Ainda usando  $R^2LED$  foi feito um estudo estatístico da distribuição de desempenho de uma população de 116 LED azuis, todos de um mesmo fornecedor, de um mesmo lote de fabricação, mantendo-se fixa a corrente de polarização (10 mA). Neste ensaio, o ângulo de posicionamento foi mantido, cuidadosamente, constante e igual a  $90^\circ$ . A partir dos dados obtidos foi possível estimar a dispersão da produção de fótons desta população, conforme ilustrado na Figura 15.

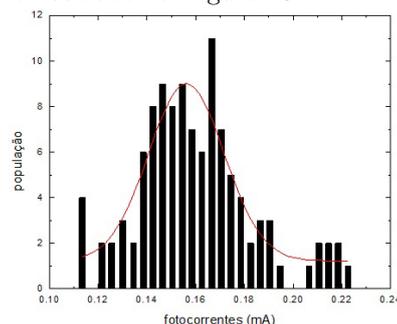


Figura 15: Curva de distribuição de desempenho para uma população de 116 LEDs azuis.

No centro da distribuição os LEDs geram até 0.156 mA no fotodiodo, a altura da distribuição é de 7,8 eventos. Isso determina uma meia altura de 3.9 LEDs, sendo que a largura para a meia altura é de 0.031 mA ou um desvio percentual de 9.95%. Dentro do intervalo tido como um desvio padrão foi observado que 80 LEDs estariam compreendidos dentro deste limite. Dentro de tal limite, se considerada uma população caracterizada como atendendo a uma distribuição normal de probabilidade, eram esperados 79 LEDs. Como o número estimado e o número observado são consistentes entre eles, conclui-se que o universo amostrado tem significância estatística. Ainda desse estudo, ficou evidenciado que 15 LEDs apresentaram desempenho abaixo da média, enquanto que 21 desses elementos superaram esta média no critério intensidade de luz emitida.

## 5 Conclusão

Na medida em que se utiliza cada vez mais LEDs enquanto fonte de luz, a caracterização destes dispositivos passa a ser indispensável para os grupos de pesquisa e laboratórios de desenvolvimento. Este trabalho apresenta uma solução de instrumentação para a caracterização dos parâmetros de irradiância e homogeneidade do campo de radiação de LEDs de 3 e 5 mm encapsulados em epóxi. No intuito de dar crédito e ênfase ao radiômetro  $R^2LED$  concebido, desenvolvido e montado no

LaPO do IF-UFBA são apresentados os resultados de três diferentes rotinas de caracterização: (1) determinação do poder de irradiância de LEDs; (2) determinação da resposta angular do LED em teste; (3) caracterização da curva de dispersão do desempenho de uma população de LEDs, de um mesmo fabricante e de um mesmo lote de fabricação. Na medicina a utilização de LEDs tem se torna-do cada vez mais freqüente, portanto o bom uso desta tecnologia passou a ser indispensável. O radiômetro proposto neste trabalho pode ser um instrumento de grande ajuda na otimização da potencia ótica dos LEDs, de modo a obter máxima irradiância e estabe-lecer da direção de maior iluminância, contribuindo com os tratamentos médicos foto-terapêuticos.

Foi projetado, desenvolvido e montado no Laboratório de Propriedades Óticas do Instituto de Física da UFBA um radiômetro para caracterizar LEDs de 3 e 5 mm encapsulados em epóxi. Este radiômetro segue as normas internacionais de medição de LEDs, preconizadas pela CIE 127 de 1997, revisada em 2007. Com base nos resultados obtidos, foi possível determinar o poder de irradiância de LEDs comerciais das cores vermelho, amarelo, verde, azul e violeta, foi possível evidenciar a grande variação de desempenho desses dispositivos. Esta grandeza, expressa é em  $(W/m^2)/A$ , pode ser usada como referência para a normalização da intensidade em aplicações que requeiram o uso de um conjunto de LEDs formando uma fonte de luz policromática. O radiômetro vem munido de um goniômetro que permite determinar a dependência angular do feixe de luz gerado pelo LED. No que tange a curva de variação angular, as curvas obtidas se aproximam de uma cossenoide, onde as variações de máximos e mínimos se repetem. Este comportamento mostra consistência em relação ao que se espera para LEDs que incorporam certos aspectos construtivos (tipo de pastilha, geometria dos contatos, ancoramento das pastilhas no catodo, etc.)

Do estudo estatístico de uma população de 116 LEDs comerciais azuis ficou evidente a necessidade de caracterização destes componentes se a aplicação demanda homogeneidade de eficiência da emissão de luz. Para 80 destes LEDs o desempenho ficou caracterizado como médio, dentro do intervalo de um desvio padrão, sendo que 15 LEDs apresentaram desempenho abaixo da média e 21 superam esta média no critério intensidade de luz emitida. A otimização da potencia ótica dos LEDs; de modo a obter máxima irradiância; e o estabelecimento da direção de maior iluminância podem contribuir com os tratamentos médicos foto-terapêuticos, aumentando o aproveitamento das sessões de irradiação, e assim diminuindo o tempo dos tratamentos de PDT.

## Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer ao CNPq e FAPESB pelo financiamento, ao LaPO pelo suporte técnico e pessoal na elaboração do trabalho.

## Referências

- Barolet, D. (2008). Light-emitting diodes (leds) in dermatology, *Seminars in Cutaneous Medicine and Surgery* **27**(4): 227 – 238.
- Boylestad, R. L. and Nashelsky, L. (1984). *Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos*, Vol. 6, Prentice-Hall do Brasil.
- De Camargo, F. (2005). *Fatores que influenciam a resolução em energia na espectrometria de partículas alfa com diodos de Si*, PhD thesis, Universidade de São Paulo.
- Handbook of LED Metrology* (2000). Instrument Systems GmbH.
- Hermann, C. (1998). Cie 127-1997, measurement of leds, *Color Research & Application* **23**(2): 125–125.
- Lourenço, D. R. (2010). Sistemas de iluminação pública com gestão inteligente de consumo.
- Moreira, M. C. (2009). *Utilização de Conversores Eletrônicos que Alimentam LEDs de Alto Brilho na Aplicação em Tecido Humano e sua Interação Terapêutica.*, PhD thesis, Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Nakamura, S. (1996). High-brightness blue-green leds and first iii-v nitride-based laser diodes, *Photonics West'96*, International Society for Optics and Photonics, pp. 43–56.
- Pérez, M. d. M., Perez-Ocon, F., Lucena-Martin, C. and Pulgar, R. (2008). Stability and reproducibility of radiometric properties of light curing units (lcus). part ii: Led leus, *Dental materials journal* **27**(2): 292–299.
- Rigau, J., Artal, E. M., Trelles, M. A. and Tubert, F. B. (1998). *Acción de la luz láser a baja intensidad en la modulación de la función celular*, PhD thesis, Universitat Rovira i Virgili.
- Svilainis, L. and Dumbrava, V. (2006). Led goniometry system, *Elektronika ir elektrotechnika* **72**(8): 69–74.
- Wang, Y., Zhang, Q., Ying, J. and Sun, C. (2004). Prediction of pin diode reverse recovery, *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, Vol. 4, IEEE, pp. 2956–2959.