

# ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DE LUMINÁRIA LED APLICADA EM COMUNICAÇÃO POR LUZ VISÍVEL

Fernando César Baraviera Tosta, Marcelo de Oliveira e Alexandre de Almeida Prado Pohl

**Resumo**— Este trabalho apresenta análises de desempenho de uma luminária LED, aplicada simultaneamente para iluminação e comunicação em sistemas de comunicação por luz visível (VLC), em ambientes internos (*indoor*). Apresenta-se a análise de desempenho de um concentrador óptico acoplado à luminária por meio de medidas fotométricas e radiométricas, com suas características reproduzidas e simuladas nos softwares SolidWorks® e APEX®. As simulações foram comparadas com medições em laboratório, objetivando a utilização desses softwares em predições mais realistas de sistemas VLC e na análise de componentes ópticos. Os resultados ressaltam a importância do detalhamento das características ópticas dos materiais empregados nas simulações, bem como a necessidade de calibração de potência dos LEDs. Experimentalmente foi alcançado ganho de até 8,45 dB na transmissão com o uso do concentrador óptico.

**Palavras-Chave**— Comunicação em luz visível; LED; SNR.

**Abstract**— This work presents performance analysis of an LED luminaire, applied simultaneously for lighting and communication in visible light communication systems (VLC), indoors. The performance analysis of an optical concentrator coupled to the luminaire by means of photometric and radiometric measurements is presented, with its characteristics reproduced and simulated in the SolidWorks® and APEX® pieces of software. The simulations were compared with measurements in the laboratory, aiming to use this software in more realistic predictions of VLC systems and in the analysis of optical components. The results highlight the importance of detailing the optical characteristics of the materials used in the simulations, as well as the need for power calibration of the LEDs. Experimentally, a gain of up to 8.45 dB was achieved in the transmission with the use of the optical concentrator.

**Keywords**— Visible light communication; LED; SNR.

## I. INTRODUÇÃO

A popularização dos sistemas de comunicação sem fio têm aumentado a demanda de uso do espectro radioelétrico que, no Brasil é definido como a faixa compreendida entre 8,3 kHz a 3000 GHz. Segundo a Anatel, o Serviço Móvel Pessoal, que utiliza faixas do espectro licenciado, registrou mais de 226,7 milhões de linhas móveis no mês de janeiro de 2020 [1]. Há ainda a demanda pelo uso de dispositivos sem fio dos mais diversos operando na faixa do espectro não

licenciado, como os equipamentos de radiação restrita que embarcam tecnologias como *WiFi* e *Bluetooth*. Contudo, os fabricantes ou importadores desses dispositivos que utilizam radiofrequências (RF) passam por processos de certificação e homologação compulsória [2]. Assim, considerando que o espectro de RF é um recurso finito e o uso de altas frequências (ondas milimétricas) sofrem com o aumento da atenuação no espaço livre e efeitos de somreamento [3], buscar alternativas para o provimento de comunicação sem fio fora dessas faixas de frequências torna-se importante, e é nesse contexto que as comunicações que usam a banda do espectro óptico surgem como opção.

As comunicações ópticas sem fio (*optical wireless communication* - OWC) tornam-se uma tecnologia complementar e de alta capacidade às radiocomunicações. Sistemas OWC utilizam comprimentos de onda no espectro de infravermelho, ultravioleta e o espectro de luz visível [4]. Em 1979 foram apresentados estudos sobre o canal óptico difuso na faixa do infravermelho e demonstrada a viabilidade para comunicações [5]. Nos anos 2000 foi proposto um sistema de comunicação óptica sem fio com LEDs de cor branca para um *link* doméstico [6].

A faixa do espectro eletromagnético para a luz visível está compreendida entre 430 THz e 790 THz, localizada em frequências muito superiores às utilizadas nas radiocomunicações. Existem vários estudos sobre o canal óptico sem fio em diferentes condições espaciais e configurações ópticas, com base em medições diretas ou simulações de traçados de raios. Os trabalhos [7] e [8], por exemplo, descrevem o uso da técnica do traçado de raios com o software Zemax® para caracterização e modelagem da resposta ao impulso do canal.

O presente trabalho tem como objetivo elaborar estudos mais realistas da VLC nas simulações com traçados de raios, utilizando-se o software Apex® que combina os recursos de análise óptica em complemento ao ambiente de modelagem 3D do software SOLIDWORKS®.

Como referência foi utilizada uma luminária composta pelo concentrador de luz, modelo PL 121140 [9], disposto sobre sete LEDs Luxeon, modelo LX18-P150 [10] (Fig. 1). Esse conjunto foi reproduzido no SolidWorks® e inserido em um cenário *indoor* que introduz parâmetros ópticos dos materiais utilizados e das fontes de luz LED disponíveis na biblioteca do APEX®, permitindo a análise do enlace de comunicação. Para efeitos comparativos, a luminária também foi caracterizada com medidas em laboratório. As informações obtidas foram utilizadas para estimativa da Taxa de Erro de Bit (*Bit*

Fernando César Baraviera Tosta, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba-PR, e-mail: fernandotosta@anatel.gov.br; Marcelo de Oliveira, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba-PR, e-mail: marcelos@outlook.com; e Alexandre de Almeida Prado Pohl, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba-PR, e-mail: pohl@utfpr.edu.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq.

*Error Rate* - BER) em função da Relação Sinal Ruído (*signal – to – noise ratio* - SNR) do sinal modulado.

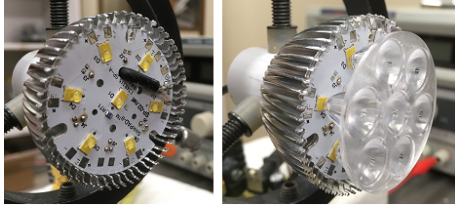


Fig. 1. Luminária utilizada nos estudos contendo o elemento concentrador de luz encaixado na base com os dispositivos LED.

O artigo foi organizado da seguinte forma: a seção II é dedicada à introdução das características das fontes de luz, dos fotodetectores (fotodiodos) e dos parâmetros para caracterização do canal óptico sem fio. Na seção III é apresentado o modelo reproduzido para simulação no APEX<sup>®</sup>. Na seção IV é realizada a caracterização prática da luminária. A seção V apresenta os resultados obtidos e, na seção VI, as conclusões sobre os estudos realizados.

## II. CANAL ÓPTICO SEM FIO

A análise dos sinais de luz a serem transmitidos pelo meio óptico necessita de uma caracterização da resposta ao impulso de seu canal, que é usada para analisar e combater os efeitos das distorções [11]. O meio de comunicação a ser analisado é o ar. As comunicações nessa faixa do espectro são predominantemente em linha de visada e o uso da luz nas comunicações vêm sendo objeto de estudos que passam pelo modelamento do canal para a propagação de sinais ópticos no espaço livre [12]. O modelo de canal pode ser descrito pelo modelo contínuo no tempo para um enlace de comunicação ruidoso:

$$Y(t) = \gamma X(t) \otimes h(t) + N(t), \quad (1)$$

onde,  $Y(t)$  representa a réplica distorcida do sinal transmitido  $X(t)$  e  $\gamma$  é a responsividade do detector. O sinal é convolucionado com a resposta ao impulso do canal,  $h(t)$ , e distorcido pelo ruído AWGN (*Additive White Gaussian Noise*),  $N(t)$  [11].

A trajetória dos raios de luz em um meio homogêneo é retilínea. Assim, a geometria de um cenário de comunicações sem fio pode ser definida pela posição e características de irradiação/detecção dos transmissores e receptores em um ambiente interno ou externo, com determinadas propriedades de reflexão dos objetos ali presentes [13].

### A. Fontes de luz e fotodetectores

Há uma série de fontes de luz disponíveis, mas as fontes comumente usadas em comunicações ópticas sem fio são os LEDs e Diodos Laser (*laser diodes* - LDs). Na recepção o sinal é detectado por meio de um fotodiodo PIN (fotodiodo p-intrínseco-n) ou APD (fotodiodo de avalanche) que responde na faixa do espectro de luz visível. De modo análogo ao LED, o fotodiodo possui um campo, ou ângulo, de visão (*Field*

*of View* - FOV) pelo qual é possível ajustar parâmetros da geometria do enlace de comunicação e da incidência de sinais interferentes, como a luz ambiente. A Fig. 2 ilustra um enlace no qual são representados os raios irradiados por uma fonte de luz LED que incidem direta e indiretamente em um dispositivo fotodiodo.

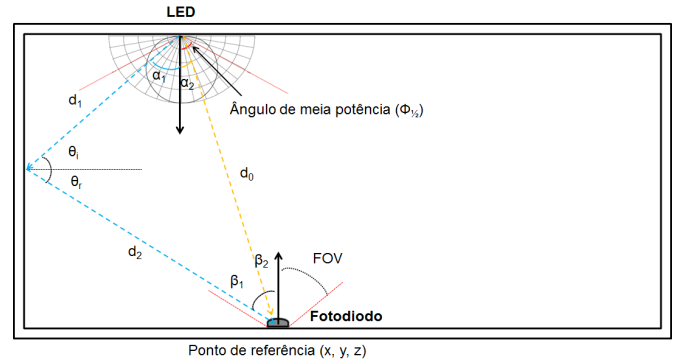


Fig. 2. Propagação em um enlace de comunicação sem fio. Além do sinal recebido em visada direta, também são recebidas parcelas do sinal sem linha de visada. Os ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  denotam os ângulos de irradiação e incidência, respectivamente.

O LED possui distribuição de feixe lambertiano, o que significa que a distribuição espacial da intensidade luminosa é uma função cosseno, descrita pela Equação 3, na qual  $g_t$  é a distribuição da intensidade luminosa espacial normalizada e  $m$  é a ordem da emissão lambertiana que depende do ângulo de meia potência do LED ( $\phi_{1/2}$ ), no qual a intensidade da luz diminui para metade da intensidade axial (FOV).

$$m = -\frac{\ln(2)}{\ln(\cos(\phi_{1/2}))}, \quad (2)$$

$$g_t(\alpha) = \cos^m(\alpha). \quad (3)$$

O ganho DC do canal para comunicação VLC é apresentado em [6], [14], [15]:

$$H(0) = \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\alpha) T_s(\beta) g(\beta) \cos(\beta), \quad (4)$$

onde:  $A$  representa a área física do fotodiodo,  $d$  é a distância entre o transmissor e o receptor,  $\alpha$  é o ângulo de irradiação,  $\beta$  o ângulo de incidência,  $T_s(\beta)$  é o ganho do filtro óptico e  $g(\beta)$  o ganho do concentrador na recepção.

No fotodiodo o sinal óptico é convertido em corrente elétrica. Semelhante ao LED, o FOV de um fotodiodo é definido como o ângulo entre os pontos do padrão de detecção, no qual a diretividade é reduzida para 50% e a resposta espectral do receptor é determinada pela resposta espectral do próprio fotodiodo e de filtros ópticos que venham a ser utilizados. Esta resposta espectral é descrita pelo fator de conversão da potência óptica em corrente elétrica conhecido como responsividade. Tipicamente, os valores máximos de responsividade em fotodiodos do tipo PIN varia entre 0,6 e 0,8 [A/W], respondendo em uma faixa espectral mais ampla que as alcançadas pelos LEDs [11]. A fotocorrente recebida é

então amplificada, seguida pelo processamento e demodulação do sinal para recuperar os dados transmitidos [16].

### B. Relação sinal-ruído

Enlaces de comunicação estão sujeitos a ruídos de interferências. A Relação Sinal-Ruído expressa a qualidade da comunicação. Segundo [15], para o cálculo da SNR são consideradas três fontes de ruído: térmico, balístico e a interferência intersimbólica (ISI - *Inter Symbol Interference*) [15]. A variância total  $N$ , que é a soma da contribuição dos ruídos, é descrita pela Equação 5.

$$N = \sigma_{\text{térmico}}^2 + \sigma_{\text{balístico}}^2 + \gamma^2 P_r^2 \text{ISI}. \quad (5)$$

As parcelas referentes aos ruídos térmico e balístico são caracterizadas pelas equações 6 e 7, onde,  $q$  é a carga do elétron e  $k$  a constante de Boltzmann. Os parâmetros considerados estão descritos na Tabela I. A área de fotodetecção utilizada é a do fotodiodo S121C [17] e os demais valores são obtidos de [15].

$$\sigma_{\text{térmico}}^2 = \frac{8\pi k T_k}{G} \eta A I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 k T_k \Gamma}{g_m} \eta^2 A^2 I_3 B^3, \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{balístico}}^2 = 2q\gamma(P_r \text{Sinal} + P_r \text{ISI})B + 2qI_{bg}I_2B. \quad (7)$$

Para cálculo da SNR são considerados os fatores de ruído apresentados pela Equação 5 e a potência óptica recebida e convertida em fotocorrente pelo dispositivo fotodiodo ( $\gamma^2 P_r^2$ ).

$$SNR = \frac{\gamma^2 P_r^2}{N}. \quad (8)$$

TABELA I  
PARÂMETROS PARA CÁLCULO DA SNR

Parâmetro	Símbolo	Valor
Temperatura ambiente	$T_k$	300 K
Ganho de malha aberta	$G$	10
Capacitância fixa	$\eta$	12 pF/cm <sup>2</sup>
Área efetiva do fotodiodo	$A$	0,71 cm <sup>2</sup>
Fator de ruído	$I_2$	0,562
Fator de ruído	$I_3$	0,0868
Fator de ruído equivalente	$B$	100 MHz
Fator de ruído do canal FET	$\Gamma$	1,5
Transcondutância do FET	$g_m$	30x10 <sup>-3</sup> S
Carga do elétron	$q$	1,602x10 <sup>-19</sup> C
Responsividade do fotodiodo	$\gamma$	0,54 A/W
Interferência intersimbólica (100 Mbps)	$P_{ISI}$	18,52 nW
Fotocorrente devido à luz ambiente	$I_{bg}$	5,1 mA
Ganho do filtro na recepção	$T_s(\beta)$	0 dB
Ganho da lente na recepção	$g(\beta)$	3,82 dB

### C. Modulação

Sistemas VLC podem ser realizados pela aplicação da modulação de intensidade com detecção direta (IM/DD, *intensity modulation with direct detection*). Trata-se da maneira mais simples de modulação, na qual é variada a corrente de alimentação de uma fonte de luz LED por meio de um sinal modulante, de valor real e unipolar (não negativo).

Na modulação OOK-NRZ, assumindo uma forma de pulso retangular cuja duração é igual ao período de bit, a BER (taxa de erro de bit) é dada por [15]:

$$BER = Q(\sqrt{SNR}). \quad (9)$$

### III. REPRODUÇÃO E SIMULAÇÃO DA LUMINÁRIA

Todo o conjunto óptico apresentado na Fig. 1 foi reproduzido no Solidworks® tendo como referência as medidas do concentrador PL 121140 e atribuído o policarbonato como material. Foram utilizadas fontes de luz LED Lumileds, modelo LXML-PW31 [18], disponível na biblioteca do aplicativo e com características similares às do LED LX18-P150. À base sobre a qual são acomodados os LEDs foi atribuída refletividade de 80% [19] (Fig. 3).

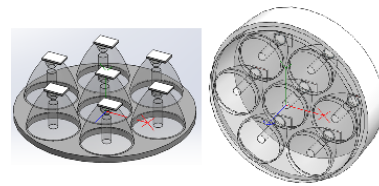


Fig. 3. Luminária reproduzida no Solidworks® e utilizada nas simulações no APEX®. Na imagem da esquerda podem ser observados os LEDs encaixados no elemento concentrador e à direita o conjunto acomodado sobre a base.

Uma das simulações realizadas dispôs a luminária na região central de uma sala quadrada (4,8 m x 4,8 m) e afastada de 2,5 m do piso. As paredes da sala receberam um revestimento com diferentes refletâncias. Após a execução do traçado de raios tendo como referência o próprio piso, foi observado o efeito da inclusão do elemento concentrador (Fig. 4).

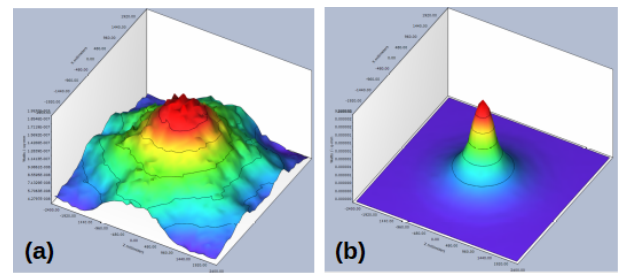


Fig. 4. Distribuição da Irradiância ( $W/mm^2$ ) em uma sala de (4,8 x 4,8 x 2,5 m<sup>3</sup>): (a) sem concentrador; (b) com concentrador.

No APEX® as superfícies que recebem o fluxo radiométrico funcionam como sensores. Foi desenhada uma peça circular com área de 0,71 cm<sup>2</sup>, que corresponde à área de fotodetecção, posicionada no eixo de alinhamento com a luminária para realização de medidas do fluxo radiométrico sobre esta superfície. Os sete LEDs foram calibrados no *software* para emissão total nas potências de 2,6 W e 2,08 W, sendo obtidos, respectivamente, os fluxos luminosos de 725,90 lm e 205,50 lm (luminosidade reduzida). As medidas da potência óptica foram tomadas entre 0,2 e 1,0 m de distância, para a mesma superfície de 0,71 cm<sup>2</sup>. Em outra simulação, a superfície foi afastada a 1,70 m, emulando o distanciamento típico entre mesas de trabalho e luminárias de teto.

#### IV. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DA LUMINÁRIA

O levantamento das características operacionais da luminária foi realizado no Laboratório Avançado de Telecomunicações (LATE), da UTFPR, Câmpus Curitiba. O conjunto da luminária foi montado sobre uma mesa óptica e alimentada por uma fonte variável de corrente contínua. Para a fotodetecção foi utilizado um fotodiodo de silício, modelo S121C, da ThorLabs®. A Fig. 5 apresenta o *setup* utilizado para os experimentos.

As medições foram realizadas com a luz ambiente apagada e com o uso de uma capa na cor preta sobre a mesa óptica, pois observou-se uma diferença de  $5,6 \mu\text{W}$  entre medidas com e sem a capa. A luz ambiente, proveniente das lâmpadas do laboratório onde não há incidência de radiação solar, promovem um acréscimo de  $47,9 \mu\text{W}$  na potência média detectada ao serem ligadas.

Inicialmente foi verificada a distribuição da potência espectral da luminária com espectrômetro de banda modelo CCS200 da Thorlabs®, com o qual foi detectado pico de potência óptica em 580 nm. Com isso foi ajustado o ponto de operação para aquisição das medidas do fotodiodo S121C, cuja superfície de fotodetecção é de  $0,71 \text{ cm}^2$ . Com o mesmo arranjo foi realizada a medida de iluminância utilizando-se um luxímetro Criffer Flex [20].

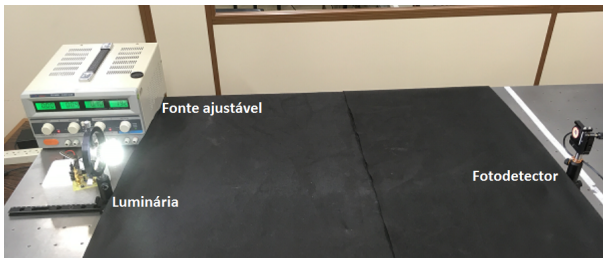


Fig. 5. Montagem do *setup* para medidas de laboratório. O arranjo de medidas pode ser modificado pela alteração da posição da luminária e do fotodiodo sobre a mesa óptica.

A corrente fornecida pela fonte variável foi reduzida do valor máximo de 280 mA até o completo apagamento em 10 mA, sendo observadas as variações da potência elétrica consumida pela luminária, a potência óptica medida (recebida) pelo fotodiodo e a iluminância medida pelo luxímetro (Fig. 6), obtendo-se cerca de 1000 lx em uma condição de luminosidade reduzida (consumo de 1,9 W).

Outro conjunto de medidas foi executado com o fotodiodo alinhado ao eixo da luminária, variando-se a distância longitudinal entre os dispositivos entre 0,2 e 1,0 m. Essas medidas consideraram quatro diferentes potências consumidas pela luminária: 1,0; 1,9; 3,9; e 5,5 W.

Mantido a 1,0 m de distância, o dispositivo fotodiodo foi desalinhado lateralmente em relação à luminária em passos de 5 cm até atingir a distância de 40 cm em relação ao eixo central. Ao ser distanciado cerca de 15 cm em relação ao eixo de alinhamento central a potência cai pela metade (Fig. 7), obtendo-se um ângulo de abertura de  $17^\circ$  com o concentrador (ordem lambertiana da emissão:  $m \approx 60$ ). Na Fig. 7 também pode ser observado o efeito prático do uso do

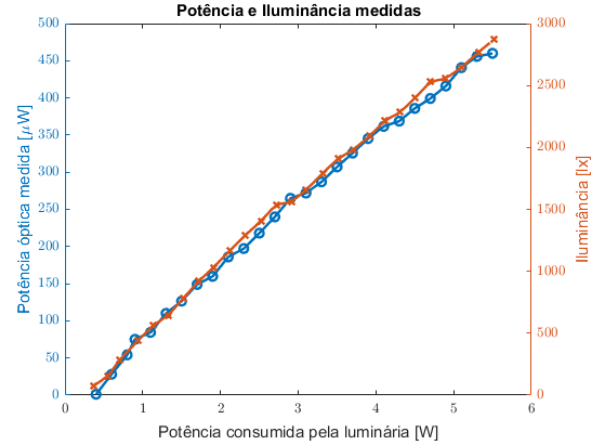


Fig. 6. Potência óptica e luminância medidas em função da variação da potência elétrica consumida pela luminária a 1,0 m de distância.

elemento concentrador pela diferença de níveis medidos pelo fotodiodo, obtendo-se ganho de 8,45 dB no ponto de máxima potência.

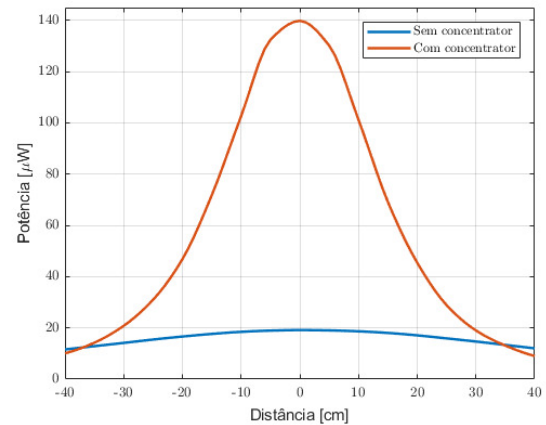


Fig. 7. Potência óptica medida pelo fotodiodo em função do desalinhamento lateral da luminária (consumo de 1,9 W).

#### V. RESULTADOS

Os valores medidos de potência óptica foram utilizados para estimação da SNR, tendo como referência para cálculo do ruído os valores descritos na Tabela I, onde o fator de ruído dominante nesses cálculos está associado à  $P_{rISI}$ .

A Fig. 8 apresenta o desempenho da modulação OOK em função do desalinhamento lateral entre os dispositivos (vide Fig. 7). A inclusão do elemento concentrador na luminária (transmissão) permite a obtenção de BER próxima a  $10^{-2}$ , que não são alcançadas sem ele. Nesse caso considerou-se  $g(\beta) = 3,82 \text{ dB}$ .

Ao ser aplicado o ganho da lente na recepção ( $g(\beta) = 3,82 \text{ dB}$ ) observa-se que há melhora significativa da SNR, conforme pode ser verificado pela Fig. 9, na qual as curvas tracejadas foram obtidas sem a aplicação de ganho na recepção. Nela também são plotados dois resultados das simulações do APEX®,



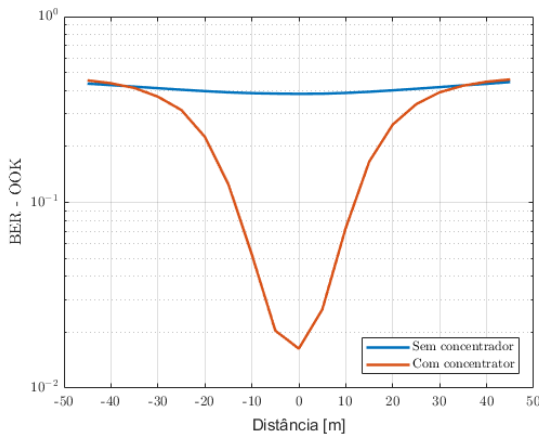


Fig. 8. Variação da BER para modulação OOK devido ao desalinhamento lateral do fotodiodo em relação à luminária (consumo de 1,9 W).

nos quais a estimativa da BER é mais otimista. A diferença entre os valores simulados e os obtidos experimentalmente pode ocorrer pelo fato de não ter sido considerada a atenuação provocada pelo material utilizado no elemento concentrador durante as simulações no APEX®

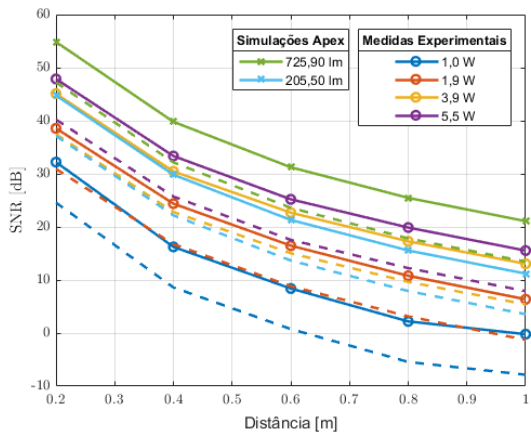


Fig. 9. Variação da SNR em função da distância para duas simulações no Apex e quatro medidas experimentais com diferentes potências consumidas pela luminária. As linhas tracejadas demonstram a SNR sem a aplicação de ganho na recepção ( $g(\beta) = 0$  dB).

Nas simulações com o APEX® à 1,70 m de distância e os LEDs com emissão em 2,6 W (725,90 lm) foi obtido um fluxo radiométrico de  $303,10 \mu\text{W}$  com uso do concentrador (área de detecção de  $0,71 \text{ cm}^2$ ). Nesse caso foi estimada uma SNR de 4,28 dB e BER de 0,05 para a modulação OOK. Ao ser considerado um ganho de 3,82 dB no *front-end* de recepção, a SNR passou a 11,92 dB e a nova BER foi estimada em  $4 \times 10^{-5}$ . Em outra simulação, realizada a 1,0 m de distância, o elemento concentrador foi desconsiderado na montagem, sendo detectados  $76,62 \mu\text{W}$  de fluxo radiométrico, implicando em um ganho de 10,56 dB no centro da luminária (local de máxima irradiância).

## VI. CONCLUSÃO

Os *softwares* SolidWorks® e APEX® demonstraram sua aplicação prática na montagem e análise de cenários na caracterização de desempenho de comunicações VLC, desde que observadas as variantes de natureza elétrica das fontes de luz e as características ópticas dos demais elementos constituintes da luminária.

Verificou-se experimentalmente que o uso do concentrador de luz permitiu um ganho de 8,45 dB na transmissão. Por outro lado, a concentração do feixe de luz limita a distribuição da iluminância, devendo ser avaliados os ângulos de meia potência dos elementos concentradores de luz, para melhor aproveitamento das soluções em comunicação VLC aplicadas a projetos de luminotécnica.

## REFERÊNCIAS

- [1] Anatel, "Acessos telefonia móvel." <https://www.anatel.gov.br/paineis/acessos/telefonia-movel>, 2020. Acessado em 22/03/2020.
- [2] Anatel, "Resolução nº 715, de 23 de outubro de 2019," 2019.
- [3] L. . W. Y. . C. C. Haas, Harald ; Yin, "What is lifi?," *Journal of Lightwave Technology*, March 15, 2016, Vol.34(6), pp.1533-1544, 2016.
- [4] IEEE, "IEEE standard for local and metropolitan area networks— part 15.7: Short-range optical wireless communications," 2018.
- [5] F. R. Gfeller and U. Bapst, "Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation," *Proceedings of the IEEE*, vol. 67, no. 11, pp. 1474–1486, 1979.
- [6] Y. Tanaka, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Wireless optical transmissions with white colored led for wireless home links," in *11th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. PIMRC 2000. Proceedings (Cat. No.00TH8525)*, vol. 2, pp. 1325–1329 vol.2, 2000.
- [7] F. Miramirkhani and M. Uysal, "Channel modeling and characterization for visible light communications," *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 6, pp. 1–16, 2015.
- [8] E. Sarbazi, M. Uysal, M. Abdallah, and K. Qaraqe, "Ray tracing based channel modeling for visible light communications," in *2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, pp. 702–705, 2014.
- [9] Kathod, "P1121140 - zeta lens. optical polymer."
- [10] Lumileds Holding B.V., *DS107 LUXEON Rebel PLUS Product Datasheet*, 2017.
- [11] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical Wireless Communications - System and Channel Modelling with MATLAB®*. Boca Raton, FL: CRC Press - Taylor Francis Group, 2013.
- [12] E. . G. R. Karp, S. ; O'Neill, "Communication theory for the free-space optical channel," *Proceedings of the IEEE*, Oct. 1970, Vol.58(10), pp.1611-1626, 1970.
- [13] S. Dimitrov and H. Haas, *Principles of LED Light Communications*. Cambridge University Press, 1ª ed., 2015.
- [14] H. Chowdhury, A. Pouttu, and M. Katz, "Performance analysis of visible light communications-based hotspots in indoor and outdoor environments," *Wireless Personal Communications*, vol. 93, no. 3, pp. 755–768, 2017.
- [15] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using led lights," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 50, pp. 100–107, Feb 2004.
- [16] D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally, and R. Parthiban, "Led based indoor visible light communications: State of the art," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1649–1678, 2015.
- [17] Thorlabs, "S121c - compact photodiode power head with silicon detector. 18358-s01, rev c."
- [18] Philips Lumileds Lighting Company., *LUXEON® Rebel Illumination Portfolio*, 2009. LUXEON Rebel ANSI Binned Datasheet DS63.
- [19] S. Bigoni, "Eficiência dos conjuntos óticos de alumínio especular de alto desempenho energético," *Dissertação de Mestrado - FAUUSP*, 2013.
- [20] "Manual criffer flex multifuncional." <https://www.criiffer.com.br/multifuncional-flex>. Acessado em 15/05/2020.