

Análise do impacto de diferentes cores na transmissão de dados por luz visível em dispositivos embarcados baseados em LEDs

Luiz Matheus, Letícia F. Pires, Alex B. Vieira
Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora – MG – Brasil
Email: luizmendes@ice.ufjf.br

Luiz F. M. Vieira, Marcos A. M. Vieira
Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte – MG – Brasil
Email: {lfvieira,mmvieira}@dcc.ufmg.br

Resumo—Comunicação por luz visível (VLC) tem atraído a atenção da academia e da indústria. Nessa linha, a comunicação LED-para-LED, em que um LED é usado como transmissor e receptor, é uma área emergente, com vantagens importantes como dispositivos de baixo preço e facilidade de implementação. Entretanto, vários fatores, como luminosidade ambiente, distância, podem influenciar esse tipo de comunicação. Neste sentido, este trabalho investiga o desempenho de VLC sob condições realistas. Foram conduzidas avaliações usando a plataforma aberta OpenVLC 1.0 para estudar o impacto na transmissão imposta por diferentes cores de LED e suas combinações. Em suma, os resultados apresentados evidenciam o impacto das cores de LEDs na comunicação e apontam configurações apropriadas para uma comunicação efetiva por VLC.

I. INTRODUÇÃO

Recentemente, Comunicação por Luz Visível (VLC) tem recebido grande atenção por parte da indústria e da comunidade acadêmica. De fato, VLC tem sido visto com uma alternativa complementar –ou mesmo substituto– à comunicação por rádio frequência VLC abre também um novo horizonte para novas aplicações. Entre elas, a localização em ambientes internos [1]–[3], Internet das coisas (IoT) [4], [5], comunicação inter-veicular [6], [7] e comunicação subaquática [8]–[10].

A escolha da tecnologia dos dispositivos de transmissão (TX) e recepção (RX) exerce um papel fundamental na qualidade do canal de comunicação [11]. Mais ainda, no cenário de Comunicação por Luz Visível, há muitos parâmetros e condições que podem afetar o desempenho da comunicação. Em VLC, normalmente, a luz é emitida por um Diodo de Emissão de Luz (LED) e, nesse sentido, variáveis como distância, campo de visão dos LEDs e luz ambiente têm influência no desempenho da comunicação. A escolha do mecanismo de recepção também é crucial visto que fotodiodos são muito mais sensíveis do que LEDs de baixa potência.

Neste artigo, avaliamos o impacto da combinação de diferentes cores de LEDs, usados como transmissores e receptores, no desempenho do canal VLC. Utilizamos a plataforma aberta OpenVLC 1.0 [12]. Nessa plataforma, o desempenho de combinações de LEDs como transmissor/receptor foi analisado em diversos cenários de cores e distâncias levando em considera-

ção a intensidade luminosa de ambientes reais, visando assim, a aplicabilidade da tecnologia em questão pela indústria.

Os resultados obtidos mostram que combinações de cores de LEDs em VLC, bem como a utilização de LEDs de baixo brilho como receptores, têm um grande impacto na qualidade da comunicação. Por exemplo, transmissões entre LEDs vermelhos e qualquer outra cor do espectro visível (e também o branco) mostraram melhores resultados, mesmo sob interferência de uma fonte com intensidade luminosa próxima ao dobro da maior intensidade avaliada pela literatura [11], já que um ambiente assim é típico de cenários realistas. A maior parte dos trabalhos na literatura [4], [13] apenas consideram LEDs de cores vermelhas. No máximo, os trabalhos consideram como transmissores cores próximas ao espectro da cor vermelha, ignorando combinações diversas. [11]. Além disso, alguns trabalhos [5] utilizam fotodiodos como receptor, e assim, desconsideram o desempenho da comunicação em uma diversidade de ambientes, mesmo quando a luz branca é formada pela combinação de LEDs RGB [14]. Por fim, as avaliações existentes [15], [16] focam em um aspecto físico da comunicação. A avaliação do canal sob condições reais de iluminação, considerando combinações de LEDs como receptores e transmissores é parte essencial do estudo de VLC que podem contribuir para aplicações tecnológicas futuras e que ainda não foi realizada por outros trabalhos.

Em suma, a avaliação conduzida neste trabalho é crucial para desenvolvedores e pesquisadores. Os resultados apresentados possibilitam a exploração do uso de VLC além das restrições de cores ou fotodiodos como vem acontecendo na atualidade. Além disso, possuem aplicações no desenvolvimento de protocolos mais eficientes, que tirem proveito de múltiplas cores de LEDs e de suas propriedades, além de levantar discussões em relação a mecanismos de acesso ao meio presentes na literatura.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Estudos envolvendo o uso bidirecional de LEDs em ambiente de comunicação por luz visível datam de 2003. O trabalho de Dietz *et al.* [17] foi o primeiro a considerar a comunicação

bidirecional entre LEDs, sendo que o foco do trabalho está na implementação do sistema, assim como na utilização dos LEDs como receptores. Schmid *et al.* [4] propuseram um sistema de comunicação bidirecional entre LEDs com codificação OOK (*On-Off Keying*). Avaliaram a sincronização dos canais, desempenho e alcance da comunicação, além do consumo de energia. O trabalho também implementou um protocolo de acesso ao meio baseado em CSMA. Ainda que os resultados alcançados tenham avançado em relação ao anterior -distâncias maiores que 2 m e vazão de 800 bps- o sistema considera apenas um par de LEDs de mesma cor. Giustiniano *et al.* [18] também implementaram um sistema de VLC, com foco na comunicação bidirecional entre LEDs. Nesse trabalho, além da implementação das técnicas envolvendo codificação e acesso ao meio, os autores também apresentaram as primeiras ideias acerca do impacto de LEDs de cores diferentes (vermelho, azul, amarelo e verde) no canal. De forma geral, os trabalhos presentes na literatura que envolvem comunicação bidirecional entre LEDs abordam aspectos técnicos da implementação, e não exploram o impacto de diferentes LEDs.

A comunicação bidirecional entre LEDs é possível porque o LED pode atuar como fotosensor seletivo. De forma geral, assume-se que o LED é capaz de receber ondas acima da frequência emitida [15]. Neste sentido, há trabalhos na literatura cujo objetivo é definir e analisar tais propriedades dos LEDs. Shin *et al.* [15] analisaram o espectro de emissão e recepção de LEDs de diferentes cores e suas aplicações como sensores de absorção no contexto da química. Kowalczyk *et al.* [16] trouxeram a aplicação para o campo da Comunicação por Luz Visível, mas limitou apenas em escolhas de LEDs das cores vermelho e âmbar como receptores e transmissores.

Lin *et al.* [19] implementaram um sistema MIMO-VLC utilizando LEDs RGB. O trabalho aborda a capacidade de recepção e emissão dos LEDs, ao desenvolver um sistema capaz de múltiplas comunicações. Além disso, os autores analisaram o desempenho da comunicação entre cores diferentes, chegando à conclusão de que canais como Vermelho-Vermelho e Azul-Verde não sofrem interferência entre si.

O presente trabalho expande as ideias apresentadas nos seguintes sentidos: primeiramente, foi feito um estudo em que a diversidade de LEDs estudados foi maior, de maneira que o espectro visível foi amplamente explorado, de acordo com cada cor. Além disso, LEDs constituídos das cores mais comuns (RGB) foram estudadas com mais detalhes, na camada de transporte do modelo TCP/IP, a fim de explorar o impacto no desempenho de um sistema VLC real. Por fim, este trabalho abre espaço para discussões relacionadas a fatores determinantes no futuro de sistemas VLC, como alocação de canais e mecanismos de acesso ao meio.

III. COMUNICAÇÃO POR LUZ VISÍVEL E LEDs

VLC é o nome dado aos tipos de comunicação em que dados são enviados através da modulação das ondas de luz no espectro visível. De maneira geral, qualquer sistema em que a informação possa ser transmitida utilizando algum tipo de luz detectada por olhos humanos pode ser chamado de VLC.

Entretanto, a comunicação ocorre sem que seja percebida aos olhos humanos [20]. nenhuma alteração notável [20].

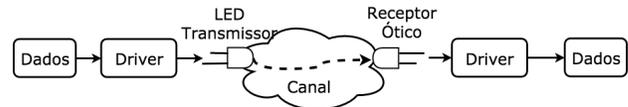


Figura 1. Arquitetura básica de um sistema VLC.

A. Arquitetura de comunicação

A arquitetura de um sistema VLC é composta, principalmente, por transmissor e receptor. Sistemas VLC sempre terão componentes para transmitir e receber luz. Na maioria dos trabalhos disponíveis na literatura, utiliza-se lâmpadas LEDs como transmissores, onde é feita a modulação da intensidade (IM) para o envio de dados. Do outro lado, fotossensores são responsáveis por captar essa luz de maneira direta, convertendo-a em corrente [21].

A Fig. 1 apresenta uma visão geral da arquitetura de um sistema VLC. Lâmpadas LEDs transmitem os dados através da modulação da intensidade da luz. Durante a transmissão da luz, há perda devido à difusão das partículas e à interferência inerente da luz do ambiente. Para diminuir a interferência, são utilizados filtros. O receptor recebe raios de luz, alterando diretamente a corrente. Amplificadores são utilizados para que os sinais sejam menos propensos a interferências e ruídos [22], e por fim, são demodulados.

Em geral, são utilizadas lâmpadas LEDs como transmissores. Estas lâmpadas contêm um *driver* responsável por controlar a corrente fornecida aos LEDs, influenciando diretamente na intensidade da iluminação. Ou seja, a corrente que chega ao LED é controlada através de transistores, que manipulam os sinais de luz que o LED emite em alta frequência.

Os receptores são responsáveis por captar a luz e convertê-la em corrente elétrica. Normalmente, são utilizados fotodiodos como receptores em sistemas de Comunicação por Luz Visível [22]. Entretanto, fotodiodos são extremamente sensíveis, e captam ondas além do espectro da luz visível, como ultravioleta e infravermelha [23]. Dessa forma, em um ambiente externo e exposto à luz solar, por exemplo, o fotodiodo falharia em receber os dados devido à alta interferência do ambiente externo. Para isso, outros componentes podem ser utilizados para captar a luz. Um deles é a própria câmera dos *Smartphones*, que permite que qualquer celular passe a receber dados em sistemas VLC [24]. Além desses dispositivos, os próprios LEDs podem ser utilizados como receptores pois apresentam características de fotossensores [12], isso permitiria uma maior flexibilidade de aplicações ao sistema.

B. LEDs como receptores

O LED (*Light Emitting Diode*) é um dispositivo que utiliza eletroluminescência e materiais semicondutores para gerar luz. Em outras palavras, LEDs são feitos de materiais que permitem a passagem de corrente em apenas um sentido

e emitem luz durante a passagem dessa corrente pelo seu material.

Por ser um diodo, o LED possui dois tipos de materiais semicondutores, em um deles há falta de elétrons (lacunas) nos átomos que o compõem, já no outro há excesso de elétrons livres. Assim, quando polarizado diretamente, elétrons livres circulam e preenchem as lacunas e, então, emitem fótons. A luz pode ser emitida no espectro visível cuja onda varia de baixas a altas frequências, definindo a cor de luz emitida. O LED vermelho, por exemplo, é comumente composto por Gálio, Arsênio e Fósforo (GaAsP), e seu comprimento de onda varia entre 630nm a 660nm¹.

Sabe-se que o LED é um semicondutor criado para desempenhar o papel de fonte luminosa. No entanto, é dada pouca ênfase ao seu papel como sensor. Essa propriedade ocorre devido ao fato de que quando a luz incide sobre o LED, uma pequena corrente é gerada [16]. A magnitude dessa corrente se relaciona com a intensidade da luz recebida. A esse fenômeno dá-se o nome de fotocorrente.

Enquanto um fotodiodo tem uma resposta espectral maior, sendo apto a detectar até mesmo luz ultravioleta e infravermelha, o LED pode ser considerado um fotodiodo seletivo, devido ao fato de que ele detecta um intervalo de comprimento de onda mais estreito [25]. Em geral, um LED de determinada cor teria a capacidade de estabelecer um canal efetivo com a mesma ou maiores frequências do que aquela que ele emite. Dessa forma, um LED vermelho detecta cores em vermelho, verde e azul, enquanto um azul pode detectar apenas o próprio azul.

IV. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO E CENÁRIO

Para realizar as avaliações, foi implementado o cenário simples em termos de VLC, que consiste em duas plataformas OpenVLC 1.0 direcionadas em uma topologia ponto-a-ponto, representado na Figura 2a.

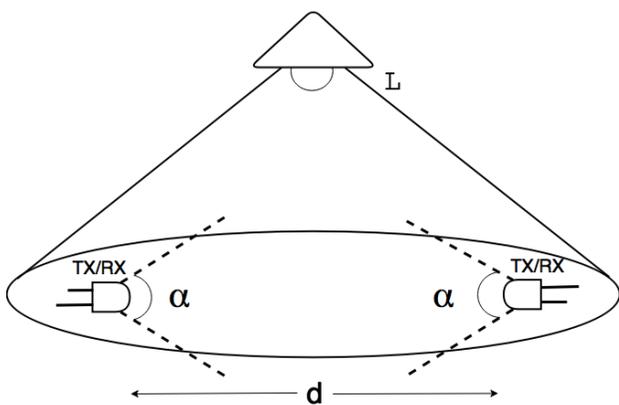


Figura 2. Disposição do sistema.

O OpenVLC é uma plataforma aberta definida por software criada para pesquisas relacionadas a Comunicação por Luz Visível. A ideia da plataforma consiste em utilizar dispositivos

como LEDs de diferentes potências e fotodiodos como *front-end*. Dessa forma, instituições acadêmicas podem utilizar a plataforma como ponto de partida no estudo de aplicações envolvendo VLC. O OpenVLC 1.0 é composto de três componentes: (i) o BeagleBone Black, uma plataforma de baixo consumo de energia, baixo custo e *open-source*, (ii) capa OpenVLC, onde os periféricos são configurados, e por fim o (iii) driver, responsável pela comunicação com camadas superiores e implementação da camada de enlace/física.

Tabela I
PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO

Parâmetro	Valor
Transmissor	Múltiplos LEDs
Receptor	Múltiplos LEDs
Frequência	50 kHz
Tamanho do payload	0.8 KB
Luz ambiente	212,5 +- 14,8 lx
Modulação	OOK
Protocolo de acesso ao meio	CSMA/CA

A Tabela I apresenta todos os parâmetros de avaliação utilizados nos experimentos. Os LEDs utilizados no experimento cobrem grande parte do espectro da luz visível (Vermelho, Laranja, Amarelo, Verde, Azul, Rosa e Branco). De acordo com trabalhos anteriores na literatura [11], foram utilizados parâmetros considerados bons para a comunicação entre os OpenVLC 1.0, visto que o objetivo do presente trabalho é avaliar o impacto das diferentes cores de LED na comunicação. Por isso, a frequência e o tamanho do *payload* do *frame* foram fixados em 50 KHz e 0.8 KB, respectivamente. Foi utilizada a modulação *On-Off Keying* (OOK) e o acesso ao meio é realizado através do mecanismo CSMA/CA.

A Figura 2a apresenta a configuração para o ambiente de avaliação. Nesse ambiente, dois OpenVLC 1.0 são dispostos em linha reta, a uma distância d , de forma que a incidência de luz emitida pelo transmissor seja captada pelo receptor. Os LEDs escolhidos para o experimento possuem um campo de visão α de 30°. Os experimentos foram realizados sob influência de luz ambiente L , dentro de um laboratório. A incidência de luz foi mantida em $212,5 \pm 14,8$ lux. Esta decisão visa a aplicação da tecnologia em ambientes internos, onde a iluminação normalmente possui essa intensidade de luz².

Na primeira etapa de avaliação, foram avaliados os parâmetros de vazão e PRR para todas as combinações de LEDs, a uma distância de 10 cm. Esta distância foi escolhida pois possibilita a comunicação entre a maioria dos LEDs. Para aqueles em que não houve possibilidade de comunicação à 10 cm, foi estudada a possibilidade de comunicação considerando distâncias menores.

Em um segundo momento, as cores que foram escolhidas para o experimento são as que constituem a matriz “RGB” e

¹LED Color Guide - <https://www.lumex.com/article/led-color-guide>, 2017.

²Recommended Light Levels for Outdoor and Indoor Venues - <https://goo.gl/mW8D2Y>, 2017.

Tabela II

TAXA DE RECEPÇÃO DE PACOTES (PRR) E VAZÃO (Kbps) PARA MÚLTIPLAS COMBINAÇÕES LED-LED EM UMA DISTÂNCIA DE 10 CM (CÉLULAS COM MARCADORES REPRESENTAM COMBINAÇÕES EM QUE A COMUNICAÇÃO FOI POSSÍVEL PARA DISTÂNCIAS MENORES QUE 10 CM).

Transmissor \ Receptor	Vermelho	Laranja	Amarelo	Verde	Azul	Rosa	Branco
Vermelho	88.53 % 9.86 kbps	86.11 % 11.63 kbps	97.38 % 5.58 kbps	95.86 % 5.50 kbps	96.83 % 5.44 kbps	96.89 % 5.51 kbps	94.8 % 5.35 kbps
Laranja	46.78 % 2.69 kbps	98.23 % 6.03 kbps	89.77 % 6.66 kbps	95.16 % 5.44 kbps	50.57 % 2.52 kbps	63.89 % 3.17 kbps	99.67 % 5.76 kbps
Amarelo			79.63 % 9.81 kbps	99.11 % 5.74 kbps	61.87 % 3.06 kbps	✓	84.39 % 4.70 kbps
Verde				✓	93.77 % 5.00 kbps	65.1 % 3.19 kbps	✓
Azul					81.0 % 10.82 kbps	✓	✓
Rosa		✓			53.52 % 2.30 kbps	99.35 % 5.74 kbps	47.5 % 8.19 kbps
Branco					✓	✓	✓

também, o branco. Essa escolha se deve ao fato dessas cores serem as mais comuns em cenários em que a comunicação por luz visível é possível, como em redes veiculares, sinais de trânsito e lâmpadas de carros, e ambientes internos. Neste sentido, foram avaliadas distâncias compatíveis com ambientes internos –como escritórios– onde há infraestrutura para futuros sistemas de comunicação por luz visível.

Para esta avaliação, foram consideradas as seguintes métricas: vazão e taxa de recepção de pacotes (PRR). Esses dados foram obtidos por meio da execução da ferramenta *Iperf* enquanto pacotes de dados UDP foram enviados. Os parâmetros foram fixados para o *Iperf* estão de acordo com o estado-da-arte, sendo parâmetros ótimos para o OpenVLC 1.0 [11]; com uma vazão de 16 kbps e pacotes de tamanho 0.8 k. Do lado do servidor, as informações foram coletadas com intervalos de 2 segundos, durante 1 minuto. Os experimentos foram repetidos 5 vezes para cada combinação de LED e cada distância medida. Os experimentos foram realizados dessa forma a fim de amenizar os possíveis erros, já que não se trata de uma simulação e sim um experimento científico em ambiente real. Por fim, os resultados apresentados são médias e intervalo de confiança, de todas as amostras relativas a um dado cenário, para um nível de confiança de 90%.

V. RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES

A tabela II apresenta a combinação de LEDs e suas capacidades de detecção (representada pelas métricas analisadas e pelo símbolo ✓). As células vazias representam combinações cuja comunicação não foi possível para nenhuma distância de 10 cm ou menor. A resposta espectral dos LEDs utilizados no experimento apresentou um comportamento similar ao previsto. De fato, o que se observa é a tendência de recepção sempre acima ou próximo do espectro emitido pelo LED. Não foi possível analisar as métricas para algumas combinações à uma distância de 10 cm, pois a comunicação

entre os LEDs só foi possível a distâncias menores. Ainda assim, vale ressaltar que as combinações entre Amarelo–Rosa, Verde–Verde, Verde–Branco, Azul–Rosa, Azul–Branco, Rosa–Laranja e todas em que o LED branco foi utilizado como receptor obtiveram resposta para distâncias menores.

As vazões analisadas podem variar significativamente entre as combinações de LEDs, mesmo que estejam à mesma distância. O LED vermelho, por exemplo, apresenta boas vazões, e é capaz de receber dados de qualquer outro LED no espectro, sem grande perda em termos de PRR. A taxa de recepção de pacotes tem um comportamento que acompanha a vazão. No geral, maiores vazões apresentam maiores PRR. As maiores vazões encontradas foram entre os LEDs Vermelho–Vermelho, Vermelho–Laranja, Amarelo–Amarelo, Azul–Azul e Rosa–Branco. Como pode ser observado, com exceção de algumas combinações, a maioria pertence a LEDs cujas frequências de emissão são próximas.

Outra observação importante nesse contexto diz respeito ao comportamento dos LEDs de cores azul, branco e rosa. O pico de emissão do LED branco é em torno do comprimento de onda da luz azul, o que o torna capaz de receber desta cor. O mesmo ocorre para o LED rosa. Por isso, a comunicação bidirecional é possível entre essas combinações de LEDs. O LED de cor rosa apresentou um comportamento diferente das outras cores ao ser capaz de reagir ao LED laranja, o que pode ser explicado devido ao fato de LEDs rosas seguirem um princípio próximo ao dos LEDs brancos. LEDs rosas possuem uma ou duas camadas de fósforo acima de um LED azul, sendo que a primeira camada de fósforo é da cor amarela, e a segunda pode ser da cor vermelha ou laranja³. Por isso, o LED rosa é capaz de detectar as cores amarela e laranja.

A segunda parte do experimento foi feita de acordo com a escolha dos LEDs mais comuns entre os estudados anteriormente. Foi feita uma análise da emissão espectral dos LEDs

³Light Emitting Diodes - http://www.emred.fi/htmls_en/leds_en.html, 2017.

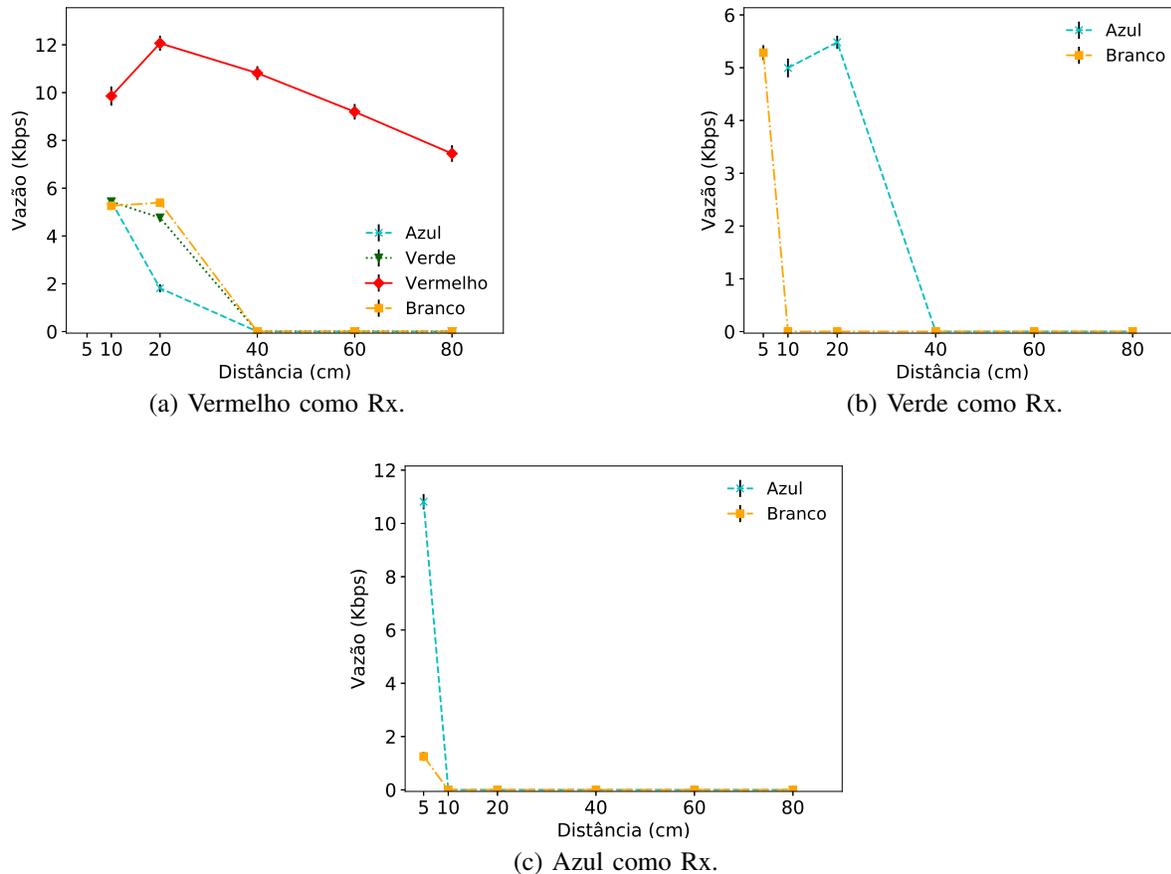


Figura 3. Vazão para LEDs de cores diferentes como Rx.

vermelho, verde e azul, com o objetivo de evidenciar a relação entre a emissão e a resposta a outras cores de LEDs. Levando em consideração as informações presentes na literatura, [11] de acordo com o gráfico, cada cor é capaz de detectar cores iguais ou de menor comprimento de onda. Portanto, cada cor foi analisada em um contexto de sistemas VLC embarcados.

A Figura 3a apresenta a vazão para o LED vermelho atuando como receptor e transmissor. Como pode ser observado, tem o mesmo comportamento do padrão encontrado na literatura [11], que apresenta seu valor entre 8 e 10 Kbps para as mesmas distâncias medidas. Na literatura mais recente, tais medições foram feitas com uma intensidade luminosa de 120 lx [11], enquanto que no presente trabalho foi feita em 215 lx, porque essa intensidade luminosa é próxima de um cenário realista. Com isso, é reforçada a hipótese de que o uso do LED vermelho como receptor atuando em conjunto com a mesma cor como transmissor obtém uma boa taxa de transferência de dados, quando comparado aos demais. Já a taxa de recepção de pacotes foi menor se comparada ao trabalho de Heydariaan *et al.*, já que o impacto do ruído no sistema – intensidade luminosa do meio – é maior.

A combinação do LED vermelho com outras cores (tabela II), algo pouco explorado em [11], [4], [18], reforça

a observação de que a resposta espectral do LED vermelho ocupa um grande intervalo do espectro visível e faz interseção com todas as outras cores. De fato, como mostra a Figura 3a, a comunicação foi possível com as outras cores, verde, azul e branco. Entretanto, o desempenho é consideravelmente menor, além de sofrer grande perda à medida em que a distância entre os nós aumenta.

A Figura 3b apresenta os resultados observados para o LED verde como receptor. Em tese, o LED verde seria capaz de detectar ondas luminosas de frequência igual ou superior a qual emite. No entanto, a resposta espectral do LED verde é mais estreita se comparada com os seus vizinhos: vermelho e azul. Essa particularidade do LED verde já foi apresentada na literatura. Shin *et al.* estudaram a resposta espectral de diferentes LEDs, e o LED verde não foi capaz de receber de um LED de mesma cor. Como pode ser visto na Figura 3, a vazão é maior para o LED azul, que apresenta seu valor máximo a 20 cm, enquanto para o LED branco a vazão máxima é menor e ocorre à distância de apenas 5 cm. Ainda como observado para a combinação e LEDs acima, a perda de pacote segue padrão inverso ao apresentado pela vazão.

Assim como o LED vermelho, os resultados para o LED azul, mostrados na Figura 3c mostraram o mesmo comporta-

mento, sendo capaz de detectar somente de cores de mesma frequência. Uma vez que a frequência de emissão do LED azul é maior do que todas aquelas dos LEDs presentes nesse estudo, ele só foi capaz de receber de um LED de cor igual e do LED branco, apresentando o mesmo comportamento em relação a vazão e taxa de recepção de pacotes explicados acima.

Por fim, os resultados apresentados para o LED branco são apenas aqueles em que atua como transmissor, visto que, como receptor, foi capaz de reagir apenas a outro LED branco, a uma distância de 1,5 cm. Por outro lado, ele foi capaz de transmitir para todas as outras cores, já que seu espectro de emissão ocupa grande parte do espectro visível.

VI. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, foi realizada uma avaliação extensa do impacto do uso de LEDs de diferentes cores no desempenho sistemas baseados em Comunicação por Luz Visível. Para isso, diferentes combinações de LEDs atuando como transmissor e receptor foram analisadas, além de cenários em que parâmetros como a distância variavam. Através dos resultados, é possível compreender a relação de emissão/resposta espectral entre LEDs de cores diferentes, assim como acrescentar novos conceitos sobre a relação da resposta espectral dos LEDs e o desempenho da comunicação.

Os resultados obtidos demonstram que os LEDs funcionam como fotodiodos seletivos. Além disso, é possível confirmar que o uso do LED vermelho como receptor em comunicação LED-LED é uma boa escolha, devido às propriedades do semicondutor do LED vermelho. A taxa média de transmissão de 10 kbps é próxima da taxa definida para a camada PHY I no padrão IEEE 802.15.7 [26].

Como trabalho futuro, pretendemos explorar as características analisadas neste trabalho mais especificamente na camada de enlace, a fim de estudar a influência das cores dos LEDs no acesso ao meio em redes VLC LED-LED, aproveitando o ambiente dinâmico oferecido pela plataforma OpenVLC 1.0.

ACKNOWLEDGMENT

Os autores agradecem o apoio de CNPq, CAPES e da FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- [1] Y.-S. Kuo, P. Pannuto, K.-J. Hsiao, and P. Dutta, "Luxapose: Indoor positioning with mobile phones and visible light," in *Proceedings of the 20th annual international conference on Mobile computing and networking*. ACM, 2014, pp. 447–458.
- [2] L. Li, P. Hu, C. Peng, G. Shen, and F. Zhao, "Epsilon: A visible light based positioning system," in *NSDI*, 2014, pp. 331–343.
- [3] S.-H. Yang, H.-S. Kim, Y.-H. Son, and S.-K. Han, "Three-dimensional visible light indoor localization using aoa and rss with multiple optical receivers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 14, pp. 2480–2485, 2014.
- [4] S. Schmid, G. Corbellini, S. Mangold, and T. R. Gross, "Led-to-led visible light communication networks," in *Proceedings of the fourteenth ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*. ACM, 2013, pp. 1–10.
- [5] S. Schmid, T. Richner, S. Mangold, and T. R. Gross, "Enlighting: An indoor visible light communication system based on networked light bulbs," in *Sensing, Communication, and Networking (SECON), 2016 13th Annual IEEE International Conference on*. IEEE, 2016, pp. 1–9.
- [6] C. B. Liu, B. Sadeghi, and E. W. Knightly, "Enabling vehicular visible light communication (v2lc) networks," in *Proceedings of the Eighth ACM international workshop on Vehicular inter-networking*. ACM, 2011, pp. 41–50.

- [7] D.-R. Kim, S.-H. Yang, H.-S. Kim, Y.-H. Son, and S.-K. Han, "Outdoor visible light communication for inter-vehicle communication using controller area network," in *Communications and Electronics (ICCE), 2012 Fourth International Conference on*. IEEE, 2012, pp. 31–34.
- [8] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Underwater optical wireless communication," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1518–1547, 2016.
- [9] I. C. Rust and H. H. Asada, "A dual-use visible light approach to integrated communication and localization of underwater robots with application to non-destructive nuclear reactor inspection," in *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*. IEEE, 2012, pp. 2445–2450.
- [10] L. Lanbo, Z. Shengli, and C. Jun-Hong, "Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 8, no. 8, pp. 977–994, 2008.
- [11] M. Heydariaan, S. Yin, O. Gnawali, D. Puccinelli, and D. Giustiniano, "Embedded Visible Light Communication: Link Measurements and Interpretation," in *Proceedings of the MadCom: New Wireless Communication Paradigms for the Internet of Things Workshop (MadCom 2016)*, February 2016.
- [12] Q. Wang, D. Giustiniano, and D. Puccinelli, "Openvlc: software-defined visible light embedded networks," in *Proceedings of the 1st ACM MobiCom workshop on Visible light communication systems*. ACM, 2014, pp. 15–20.
- [13] G. Stepniak, M. Kowalczyk, L. Maksymiuk, and J. Siuzdak, "Transmission beyond 100 mbit/s using led both as a transmitter and receiver," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 27, no. 19, pp. 2067–2070, 2015.
- [14] S. Li, B. Huang, and Z. Xu, "Experimental mimo vlc systems using tri-color led transmitters and receivers," in *2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Dec 2017, pp. 1–6.
- [15] D.-Y. Shin, J. Y. Kim, and I.-Y. Eom, "Spectral responses of light-emitting diodes as a photodiode and their applications in optical measurements," *Bulletin of the Korean Chemical Society*, vol. 37, no. 12, pp. 2041–2046, 2016.
- [16] M. Kowalczyk and J. Siuzdaka, "Influence of reverse bias on the leds properties used as photo-detectors in vlc systems," in *Proc. of SPIE Vol*, vol. 9662, 2015, pp. 966 205–1.
- [17] P. Dietz, W. Yezunis, and D. Leigh, "Very low-cost sensing and communication using bidirectional leds," in *International Conference on Ubiquitous Computing*. Springer, 2003, pp. 175–191.
- [18] D. Giustiniano, N. O. Tippenhauer, and S. Mangold, "Low-complexity visible light networking with led-to-led communication," in *Wireless Days (WD), 2012 IFIP*. IEEE, 2012, pp. 1–8.
- [19] B. Lin, W. Ye, X. Tang, and Z. Ghassemlooy, "Experimental demonstration of bidirectional noma-ofdma visible light communications," *Optics Express*, vol. 25, no. 4, pp. 4348–4355, 2017.
- [20] A. B. Vieira, L. F. Vieira, M. Vieira, J. Freire, L. M. Matheus, and O. Gnawali, "Comunicação por luz visível: conceito, aplicações e desafios," in *SBRC 2017 - Minicursos*, 2017.
- [21] C. Medina, M. Zambrano, and K. Navarro, "Led based visible light communication: Technology, applications and challenges-a survey," *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, vol. 8, no. 4, p. 482, 2015.
- [22] S. Schmid, J. Ziegler, G. Corbellini, T. R. Gross, and S. Mangold, "Using consumer led light bulbs for low-cost visible light communication systems," in *Proceedings of the 1st ACM MobiCom workshop on Visible light communication systems*. ACM, 2014, pp. 9–14.
- [23] Y. Wang and H. Haas, "Dynamic load balancing with handover in hybrid li-fi and wi-fi networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 22, pp. 4671–4682, 2015.
- [24] S. Schmid, L. Arquint, and T. R. Gross, "Using smartphones as continuous receivers in a visible light communication system," in *Proceedings of the 3rd Workshop on Visible Light Communication Systems*. ACM, 2016, pp. 61–66.
- [25] Q. Wang and D. Giustiniano, "Communication networks of visible light emitting diodes with intra-frame bidirectional transmission," in *Proceedings of the 10th ACM International on Conference on emerging Networking Experiments and Technologies*. ACM, 2014, pp. 21–28.
- [26] "Ieee standard for local and metropolitan area networks—part 15.7: Short-range wireless optical communication using visible light," *IEEE Std 802.15.7-2011*, pp. 1–309, Sept 2011.