

# Transmissor para Aplicações de Comunicação por Luz Visível com Modulação OOK-M-FSK

Ian Marson, Cassiano Ribeiro Carneiro, Marlon L. G. Salmento, Pedro S. Almeida, Henrique A. C. Braga and  
Guilherme Márcio Soares

**Resumo**— Este trabalho apresenta um circuito eletrônico para o acionamento de LEDs a partir de um barramento de corrente contínua, concebido para aplicações de transmissão de dados por luz visível. O circuito foi desenvolvido no sentido de permitir o controle do fluxo luminoso da luminária e a transmissão de dados por meio da tecnologia VLC (Visible Light Communication) de maneira simultânea. Ademais, a topologia proposta possui implementação simplificada, baixo número de componentes e boa regulação de corrente, que foi comprovada através de resultados experimentais.

**Palavras-Chave**— Comunicação por Luz Visível, Modulação em Frequência, Transmissores para Comunicação por Luz Visível.

**Abstract**— This work presents an electronic circuit for driving LEDs from a dc bus, designed for visible light communication applications. The circuit was developed in order to allow for the luminaire luminous flux control and the transmission of data through the VLC (Visible Light Communication) technology simultaneously. In addition, the proposed topology has a simplified implementation, low component count and good current regulation, which has been attested through experimental results.

**Keywords**— Visible Light Communication, Frequency Modulation, Transmitters for Visible Light Communication.

## I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a necessidade de desenvolver sistemas de iluminação mais eficientes tornou-se um importante tema de pesquisa, já que esses sistemas respondem por cerca de 15% do consumo global de energia. [1]. Nesse contexto, o uso de fontes mais eficientes, como a tecnologia de iluminação com LEDs, vem ganhando espaço no mercado e substituindo gradualmente tecnologias mais antigas, como lâmpadas fluorescentes, pois apresentam excelentes características para o sistema de iluminação, como longa vida útil, bom índice de reprodução de cores e alta eficácia luminosa [2], [3]. Além disso, como os LEDs são semicondutores, eles têm uma resposta dinâmica rápida, permitindo uma modulação de alta frequência do fluxo luminoso. A comunicação por luz visível, conhecida como VLC (Visible Light Communication), é uma tecnologia emergente que tem ganhado destaque nos últimos anos, uma vez que esta surge como uma alternativa às técnicas de comunicações por radiofrequência, não possuindo qualquer interferência com estes sistemas existentes [4]. Esta característica se deve ao fato da tecnologia VLC utilizar uma fonte de luz para a transmissão de dados e iluminação na banda do espectro eletromagnético visível (380-740 nm).

Guilherme Márcio Soares, e-mail: guilherme.marcio@engenharia.ufjf.br. Este trabalho foi parcialmente financiado por CNPq (408114/2018-5), FAPEMIG (APQ-01435-18), UFJF e IFMG.

A tecnologia VLC foi desenvolvida com mais intensidade a partir dos anos 90 com a evolução dos LEDs para iluminação. Tem se mostrado uma alternativa às comunicações por radiofrequência, uma vez que a primeira apresenta algumas desvantagens, como a limitação da potência do sinal de transmissão, o que implica no menor desempenho dos sistemas de comunicação, conseqüentemente na redução da taxa de transmissão. Além disso, a transmissão VLC não causa qualquer interferência com outros sistemas de radiofrequência existentes [4].

Entre as principais aplicações dos sistemas VLC, destaca-se a transmissão de dados entre dispositivos para aplicações internas, como escritórios, localização de pessoas e robôs em ambientes internos e comunicação subaquática. [5], [6].

Para transmitir dados por meio da abordagem VLC, alguns esquemas de modulação foram estudados. As principais estratégias relatadas na literatura são o Chaveamento On-Off (OOK) e a Modulação de Posição de Pulso Variável (VPPM) [7]; a modulação de amplitude em quadratura (QAM)[8]; a modulação da divisão de frequência ortogonal (OFDM)[9] e a chaveamento Chaveamento On-Off de frequência com um índice de modulação (OOK-M-FSK) [10]. Cada uma das técnicas citadas tem vantagens e desvantagens para que a aplicação defina qual é a mais adequada. Em [11], OOK-M-FSK foi apresentado, mostrando que tal abordagem permite uma melhoria do rendimento em comparação com as modulações mostradas no padrão IEEE 802.15.7 (OOK e VPPM) com condições operacionais similares. Além disso, a modulação acima mencionada não tem uma grande influência no desempenho do sistema de iluminação e também permite a dimmerização da luminária.

Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo do transmissor para o sistema VLC baseado na modulação OOK-M-FSK. Além disso, de propor um circuito eletrônico para acionar os LEDs a partir de um barramento de Corrente Contínua (CC), de modo que a complexidade associada aos acionadores fora de rede, que são alimentados pela rede de Corrente Alternada (CA), possa ser evitada. O circuito proposto tem uma fácil implementação, boa regulação de corrente, baixo custo e permite o controle do fluxo luminoso da luminária e a transmissão de dados através da tecnologia VLC.

## II. MODULAÇÃO OOK-M-FSK

A técnica de modulação empregada neste trabalho é uma combinação das modulações OOK e M-FSK, consistindo na codificação de sequências de bits em valores fixos de

frequências de chaveamento, onde  $M$  é o índice de modulação dado por (1). As frequências OOK-M-FSK podem ser resumidas em uma tabela de modulação, cujo exemplo é mostrado na Tabela I e mostra as mensagens em base decimal e binária, que são  $m_{(10)}$  e  $m_{(2)}$ , respectivamente. Neste exemplo, a largura de banda do sistema é de 45 kHz, o que representa a diferença entre a frequência máxima e mínima das mensagens.

TABELA I  
EXEMPLO MODULAÇÃO OOK-16-FSK

$m_{(10)}$	$m_{(2)}$	Frequência
0	0000	100 kHz
1	0001	103 kHz
2	0010	106 kHz
3	0011	109 kHz
4	0100	112 kHz
5	0101	115 kHz
6	0110	118 kHz
7	0111	121 kHz
8	1000	124 kHz
9	1001	127 kHz
10	1010	130 kHz
11	1011	133 kHz
12	1100	136 kHz
13	1101	139 kHz
14	1110	142 kHz
15	1111	145 kHz

$$M = 2^b, \quad (1)$$

em que  $b$  é o número de bits transmitidos em cada mensagem.

Na estratégia OOK-M-FSK, o sinal da portadora é uma onda quadrada cuja frequência varia em cada período. Observe que as informações estão no período de onda, definido pela diferença de tempo entre duas bordas de subida consecutivas. Portanto, a posição da borda de descida não é relevante, sendo possível o controle da luminosidade (dimerização) alterando a largura de pulso. Fig. 1 ilustra esses conceitos.

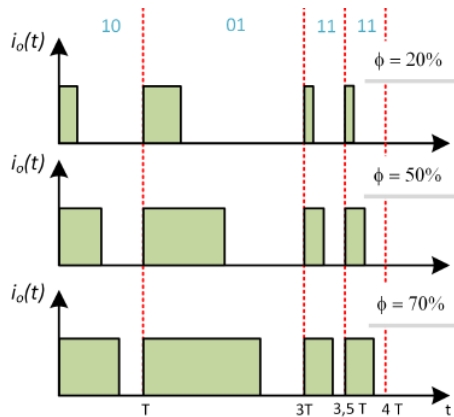


Fig. 1. Modulação OOK-4-FSK com diferentes níveis de dimerização. [11]

### III. TRANSMISSOR VLC PROPOSTA

Uma questão importante ao projetar o transmissor VLC é a característica da fonte de alimentação do sistema. Se a fonte for CA, geralmente é necessário usar circuitos mais

complexos, com requisitos como correção do fator de potência, EMI e filtragem de ondulação de baixa frequência. Por outro lado, o uso de conversores alimentados através de um barramento CC facilita a integração das funcionalidades da iluminação e dos sistemas de comunicação. Esta estratégia está alinhada com uma tendência atual: o uso de microrredes de corrente contínua para sistemas de iluminação [12]. A referida abordagem consiste em utilizar uma instalação exclusiva para o fornecimento de cargas CC, permitindo simplificar os circuitos de tais equipamentos e aumentar a eficiência geral do sistema. Portanto, o transmissor utilizado neste trabalho foi concebido para ser alimentado a partir de um barramento CC, aproveitando assim os benefícios supracitados.

Para que o circuito do transmissor seja implementado, primeiramente é necessário fazer a escolha de uma topologia para o circuito de acionamento dos LEDs que permita o controle da corrente dos dispositivos, permitindo assim o funcionamento adequado, segurança de operação e o controle do fluxo luminoso da luminária de LED.

Na literatura existem basicamente duas famílias de circuitos: os lineares e os chaveados. Os circuitos lineares são conhecidos por serem menos eficientes que os chaveados. Todavia, tais circuitos são mais simples e resultam em uma implementação com custo reduzido. Ademais, caso o arranjo de LEDs possua uma tensão similar à tensão de barramento, é possível projetar circuitos de controle da corrente dos LEDs lineares que resultem em uma boa eficiência do sistema.

Em [13] foi apresentado um circuito chaveado que possui uma ótima eficiência por ser um conversor ressonante. A referida topologia possui uma grande complexidade e alto número de elementos, sendo indicada somente para potências maiores. Por outro lado, [14] apresenta um conversor linear que utiliza um amplificador operacional, que apesar de garantir uma boa regulação, não possui uma boa velocidade de resposta, pois a velocidade de chaveamento é limitada pelo *slew-rate* do amplificador operacional.

O *driver* proposto é apresentado na Fig. 2. Essa topologia possui uma boa regulação de corrente para variações de carga e variações de tensão de entrada, além de ter baixa complexidade, comparado a outras topologias.

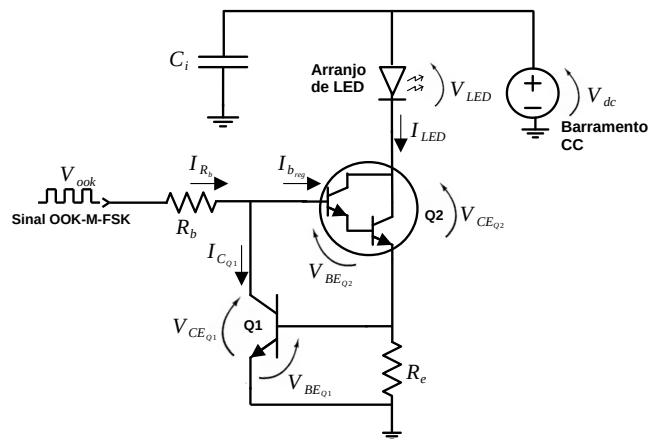


Fig. 2. Arquitetura do transmissor VLC.

A topologia consiste em um transistor de sinal  $Q_1$ , que impõe uma tensão virtualmente fixa no resistor  $R_e$ , limitando assim a corrente do ramo principal do circuito,  $I_{LED}$ , que é dada por

$$I_{LED} = \frac{V_{BEQ_1}}{R_e} \quad (2)$$

O transistor  $Q_1$  é capaz de limitar a corrente do ramo principal controlando a corrente de base do transistor Darlington ( $Q_2$ )  $I_{b_{reg}}$ . A corrente de LED desejada  $I_{LED}$  pode ser refletida para base  $Q_2$  usando o ganho do dispositivo  $\beta_{Q_2}$  através de (3).

$$I_{b_{reg}} = \frac{I_{LED}}{\beta_{Q_2}}, \quad (3)$$

em que  $I_{b_{reg}}$  é a corrente de base do transistor Darlington quando sua corrente de coletor é  $I_{LED}$ .

Para garantir o funcionamento adequado da ação de controle realizada por  $Q_1$ , a corrente através do resistor  $R_b$  deve ser maior que  $I_{b_{reg}}$ . Portanto, o resistor  $R_b$  pode ser dimensionado considerando o caso crítico, no qual o transistor  $Q_1$  está em sua região de corte. Escrevendo a equação de laço e considerando que  $I_{R_b} > I_{b_{reg}}$ , pode-se escolher  $R_b$  por meio de

$$R_b < \frac{V_{OOK} - V_{BEQ_1} - V_{BEQ_2}}{I_{b_{reg}}}, \quad (4)$$

em que  $V_{OOK}$ ,  $V_{BEQ_1}$  e  $V_{BEQ_2}$  são a tensão de pico sinal OOK-M-FSK, a tensão base-emissor de  $Q_1$  e a tensão base-emissor de  $Q_2$ , respectivamente.

Em relação ao nível de tensão do barramento CC, ele deve respeitar (5) para garantir a operação correta do circuito.

$$V_{CC} > V_{LED} + V_{CEQ_2} + V_{BEQ_1} \quad (5)$$

Finalmente, o capacitor  $C_i$  mostrado na figura tem o objetivo de realizar o desacoplamento de alta frequência entre o circuito proposto e o barramento CC.

#### IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O circuito do transmissor foi projetado de acordo com as equações apresentadas na Seção II e um protótipo de laboratório foi construído. Um microcontrolador Texas Instruments EK-TM4C123GXL foi utilizado para gerar o sinal OOK-M-FSK. Os outros componentes usados no circuito do transmissor são apresentados na Tabela II. Nos seguintes experimentos, o nível de dimerização foi de 50%, o que implica que a luminária foi operada com 2 W.

O circuito proposto para o transmissor foi testado fazendo uma varredura de frequências, de 1 kHz até 800 kHz do sinal OOK e também para variações na tensão do barramento CC para verificar a regulação de corrente e resposta do sistema por meio dessas variações.

A partir dos testes experimentais, foi possível validar a melhor faixa de frequências de operação e limitações físicas do transmissor desenvolvido. Algumas formas de onda do experimento são apresentadas nas Figuras 3, 4, 5 e 6.

TABELA II  
COMPONENTES E VARIÁVEIS DO CIRCUITO

Placa do Transmissor	
$V_{OOK}$	3.3 V
Barramento CC	24 V
$R_b$	8.3 k $\Omega$
$R_e$	3.3 $\Omega$
$C_i$	0.1 $\mu$ F
$Q_1$	BC547
$Q_2$	TIP122
Luminária de LED	
$I_{LED}$	200 mA
$V_{LED}$	19 V
Potência nominal	4 W

Como pode ser visto nas Figuras 3 e 4, o circuito apresenta uma boa capacidade de reprodução de sinais de 100 kHz, ao passo que apresenta algumas distorções quando a modulação ocorre a 800 kHz limitando a operação do protótipo em frequências mais altas, isso comparado ao sinal de entrada do circuito  $V_{ook}$ .

No que se refere à regulação de corrente, o circuito mostrou boa robustez à variações da tensão de alimentação do barramento CC, como pode ser observado nas Fig. 5 e 6, mostrando que independente das variações de tensão de alimentação no circuito, o pico de corrente dos LEDs permaneceu constante. Desta forma, foi possível constatar que o circuito foi capaz de regular corretamente a corrente nos LEDs para ambas as condições testadas *i.e.*, 24 V e 28 V.

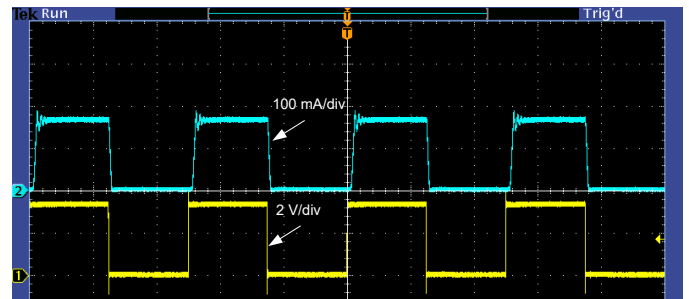


Fig. 3. Sinal de entrada do circuito  $V_{ook}$  e corrente  $I_{LED}$  para uma frequência de modulação de 100 kHz. Escala Horizontal: 4  $\mu$ s/div.

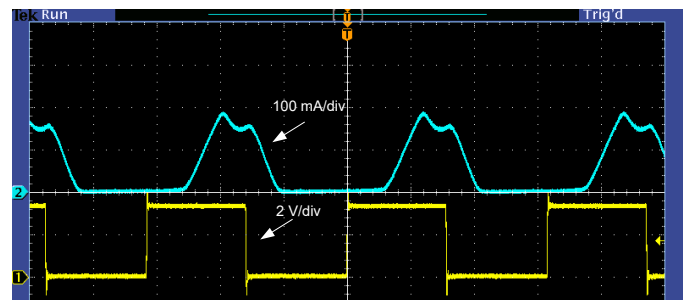


Fig. 4. Sinal de entrada do circuito  $V_{ook}$  e corrente  $I_{LED}$  para uma frequência de modulação de 800 kHz. Escala Horizontal: 400 ns/div.

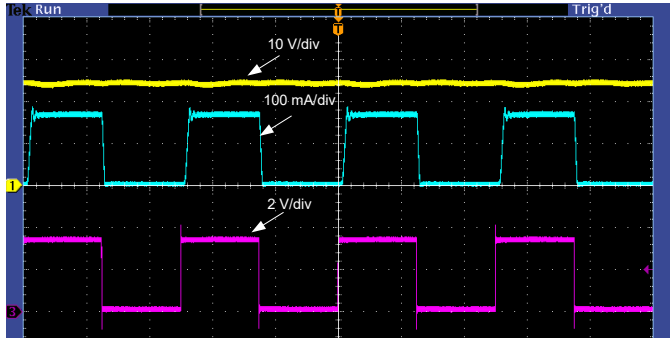


Fig. 5. Funcionamento do circuito para uma frequência de modulação de 100 kHz de  $V_{cc} = 24V$ . Escala Horizontal:  $4 \mu s/div$ .

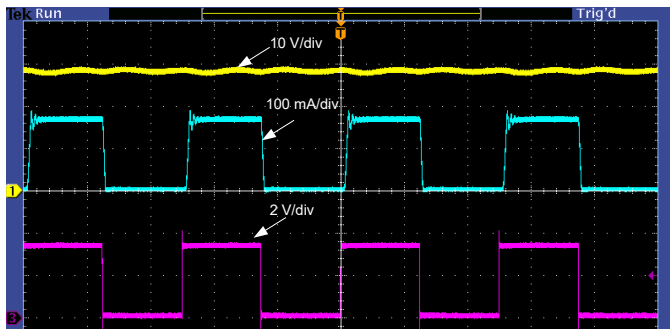


Fig. 6. Funcionamento do circuito para uma frequência de modulação de 100 kHz de  $V_{cc} = 28V$ . Escala Horizontal:  $4 \mu s/div$ .

## V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a topologia de um circuito de baixo custo para aplicações VLC em que o *driver* dos LEDs é alimentado a partir de um barramento CC. Foi apresentada a rotina de projeto e os resultados experimentais comprovaram o bom funcionamento da proposta.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq (processo número 408114 / 2018-5), FAPEMIG (processo número APQ-01435-18), UFJF e IFMG por apoiar financeiramente este trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] G. Dreyfus and C. Gallinat, "Rise and shine: Lighting the world with 10 billion led bulbs," *US Department of Energy*, vol. 7, 2015.
- [2] A. Laubsch, M. Sabathil, J. Baur, M. Peter, and B. Hahn, "High-power and high-efficiency ingan-based light emitters," *IEEE transactions on electron devices*, vol. 57, no. 1, pp. 79–87, 2019.
- [3] E. F. Schubert, T. Gessmann, and J. K. Kim, "Light emitting diodes 193," 2005.
- [4] S. Dimitrov and H. Haas, *Principles of LED light communications: towards networked Li-Fi*. Cambridge University Press, 2015.
- [5] T. Tanaka and S. Haruyama, "New position detection method using image sensor and visible light leds," in

2009 Second International Conference on Machine Vision. IEEE, 2009, pp. 150–153.

- [6] C. S. Martins, "Comunicação óptica sem fios baseada em díodos emissores de luz branca," Master's thesis, 2011.
- [7] F. Che, L. Wu, B. Hussain, X. Li, and C. P. Yue, "A fully integrated ieee 802.15. 7 visible light communication transmitter with on-chip 8-w 85% efficiency boost led driver," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 10, pp. 2419–2430, 2016.
- [8] J. Rodríguez, D. G. Lamar, P. F. Miaja, and J. Sebastián, "Reproducing single-carrier digital modulation schemes for vlc by controlling the first switching harmonic of the dc–dc power converter output voltage ripple," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 9, pp. 7994–8010, 2018.
- [9] M. S. Mossaad, S. Hranilovic, and L. Lampe, "Visible light communications using ofdm and multiple leds," *IEEE transactions on communications*, vol. 63, no. 11, pp. 4304–4313, 2015.
- [10] J. G. Proakis and M. Salehi, *Fundamentals of communication systems*. Pearson Education India, 2007.
- [11] M. L. G. Salmento, G. M. Soares, J. M. Alonso, and H. A. Braga, "A dimmable off-line LED driver with OOK-M-FSK modulation for VLC applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 7, pp. 5220–5230, 2019.
- [12] B. T. Patterson, "dc, come home: dc microgrids and the birth of the"enernet"," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 10, no. 6, pp. 60–69, 2012.
- [13] S. Zhao, J. Xu, and O. Trescases, "Burst-mode resonant llc converter for an led luminaire with integrated visible light communication for smart buildings," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 8, pp. 4392–4402, 2013.
- [14] Y. Hu and M. M. Jovanovic, "Led driver with self-adaptive drive voltage," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 6, pp. 3116–3125, 2008.