

# Receptor para Sistemas de Comunicação por Luz Visível Baseados na Modulação OOK-M-FSK

Cassiano Ribeiro Carneiro, Ian Marson, Marlon L. G. Salmento, Alexandre B. dos Santos, Pedro S. Almeida, Henrique A. C. Braga e Guilherme Márcio Soares

**Resumo**— Este trabalho traz uma análise de projeto e funcionamento de um receptor para sistemas de comunicação por luz visível baseados na modulação OOK-M-FSK. São apresentados os blocos funcionais do circuito, bem como o algoritmo de demodulação do sinal VLC. Resultados experimentais mostraram o funcionamento adequado de ambos, uma vez que os sinais VLC OOK-M-FSK foram corretamente demodulados para diversos testes e condições.

**Palavras-Chave**— Comunicação por Luz Visível, Modulação em Frequência, Circuito para Recepção de Dados por Luz Visível.

**Abstract**— This work presents an analysis of the design and operation of a receiver for visible light communication systems based on the OOK-M-FSK modulation. The functional blocks of the circuit are presented, as well as the demodulation algorithm for the studied VLC signal. Experimental results shown the proper operation of both, since the VLC OOK-M-FSK signal were correctly demodulated for several tests and conditions.

**Keywords**— Visible Light Communication, Frequency Modulation, Visible Light Data Reception Circuit.

## I. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por sistemas de comunicação de dados faz ser de singular importância o desenvolvimento de novas tecnologias para o atendimento deste nicho. Neste contexto, a comunicação por luz visível, conhecida como VLC (Visible Light Communication), é uma tecnologia emergente que tem ganhado destaque nos últimos anos, surgindo como alternativa às técnicas de comunicação por radiofrequência, não causando interferências com outros sistemas de comunicação presentes no mesmo ambiente [1].

Entre as principais aplicações dos sistemas VLC, destacam-se a transmissão de dados entre dispositivos para aplicações internas, como escritórios, a localização de pessoas e robôs em ambientes internos e a comunicação subaquática. [2], [3].

Para transmitir dados por meio da abordagem VLC, algumas técnicas de modulação foram desenvolvidas. Dentre as principais relatadas na literatura, destacam-se a modulação On-Off (OOK), a modulação de posição de pulso variável (VPPM), ambas reportadas na norma IEEE 802.15.7 [4], e também a modulação (OOK-M-FSK) [5], que permite enviar mais de um bit por ciclo. A modulação OOK-M-FSK apresenta vantagens em relação às modulações OOK e VPPM quanto à taxa de comunicação e também possibilita a dimerização da carga através do controle da largura do pulso (PWM) de maneira independente da transmissão dos dados.

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.

Este trabalho apresenta o estudo de um receptor para o sistema VLC baseado na modulação OOK-M-FSK.

## II. MODULAÇÃO OOK-M-FSK

A técnica de modulação OOK-M-FSK se baseia na transmissão de mensagens a partir de um sinal PWM cuja frequência é redefinida a cada ciclo. Com um total de  $M$  valores distintos de frequência, cada um representa univocamente um conjunto predefinido de  $\log_2(M)$  bits, como exemplificado na Tabela I para  $M = 4$ .

TABELA I  
EXEMPLO DA MODULAÇÃO OOK-4-FSK COM UM INTERVALO DE  $3kHz$  ENTRE CADA MENSAGEM

$m$	Frequência
00	100 kHz
01	103 kHz
10	106 kHz
11	109 kHz

No receptor, as mensagens podem ser decodificadas a partir da leitura do período de cada ciclo do sinal recebido, definido pela diferença de tempo entre a ocorrência de duas bordas de subida consecutivas. Sendo assim, a posição da borda de descida não é relevante, possibilitando o controle da luminosidade (dimerização) com a alteração da largura do pulso. A Fig. 1 ilustra tais conceitos para  $M = 4$ .

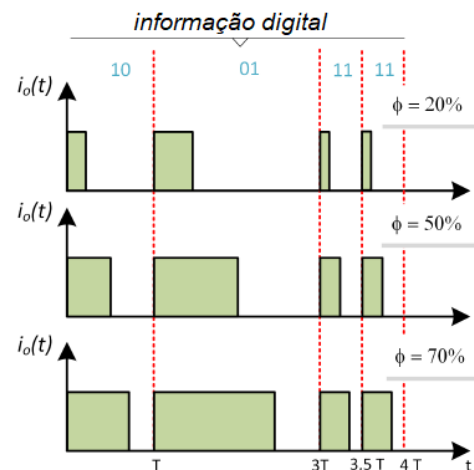


Fig. 1. Modulação OOK-4-FSK com diferentes níveis de dimerização. [5]

### III. RECEPTOR OOK-M-FSK

O circuito proposto para o receptor VLC está mostrado na Fig. 2, sendo composto por um fotodetector (FD), um amplificador de transimpedância (ATI), um filtro passa-banda (FPB), um comparador e um microcontrolador ( $\mu C$ ) que executa o algoritmo de demodulação. O sinal luminoso que incide sobre o FD é transformado em um sinal de corrente e posteriormente em um sinal de tensão pelo ATI. Após ser filtrado pelo FPB, o comparador regenera o sinal para que fique compatível com as entradas digitais do microcontrolador.

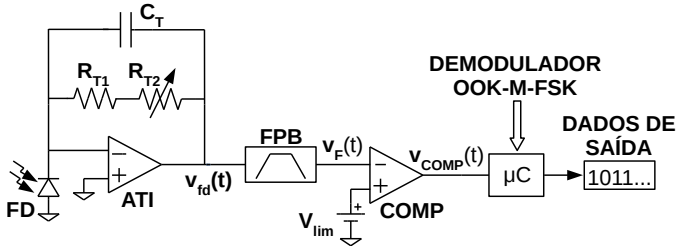


Fig. 2. Arquitetura do receptor VLC.

O filtro passa-banda consiste de um filtro RC passa-alta, com frequência de corte  $f_{C1}$ , conectado em cascata com um filtro Sallen-Key passa-baixa, com frequência de corte  $f_{C2}$ . O objetivo desta filtragem é a remoção do nível CC do sinal, bem como a atenuação de ruídos de alta frequência, o que aumenta a robustez do sistema frente a outras fontes de luz e harmônicas da rede de alimentação. Como mostrado em [5], o sinal de saída do filtro é dado por

$$v_F(t) = \mathcal{L}^{-1}\{H_{PB}(s) \cdot H_{PA}(s) \cdot V_{fd}(s)\}, \quad (1)$$

em que  $H_{PB}(s)$  e  $H_{PA}(s)$  são as funções de transferência dos filtros passa-baixa e passa-alta, respectivamente, e  $V_{fd}(s) = \mathcal{L}\{v_{fd}(t)\}$  é o sinal proveniente do fotodetector.

O sinal de saída do comparador é dado por (2).

$$v_{comp}(t) = \begin{cases} V_{sat}, & \text{if } v_F(t) < V_{lim} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (2)$$

onde  $V_{sat}$  é a tensão de saturação do comparador, devendo ser compatível com a entrada digital do microcontrolador. A tensão de limiar,  $V_{lim}$  deve ser definida empiricamente levando em conta o ruído do sinal  $v_F$ .

Como na modulação OOK-M-FSK a informação está contida na frequência/período do sinal recebido, o demodulador deverá possuir a capacidade de ler tal parâmetro. Sendo assim, o algoritmo de demodulação implementado no microcontrolador consiste de um detector de bordas de descida (pois o sinal é invertido no comparador) e de um contador para representação do tempo, que opera a uma frequência  $f_{clk}$ . A cada instante de ocorrência de uma borda de descida, o valor do contador é amostrado. Posteriormente, o período do sinal recebido é calculado a partir da diferença  $\delta_k$  entre a amostra atual do contador,  $x_k$ , e a amostra imediatamente anterior,  $x_{k-1}$ , dado por (3).

$$\delta_k = x_k - x_{k-1} \quad (3)$$

Deste modo, no algoritmo proposto, cada mensagem é caracterizada pelo número de períodos de clocks que ocorrem entre duas bordas de descida consecutivas de  $v_{comp}$ . É possível, portanto, escrever uma equação que relaciona a mensagem  $m_k$  (na base decimal) com o  $\delta_k$ :

$$m_k = \left\lfloor \frac{f_{clk}}{f_{int}} \cdot \frac{1}{\delta_k} - \frac{f_{menor}}{f_{int}} \right\rfloor \quad (4)$$

onde  $\lfloor \cdot \rfloor$  é o operador de arredondamento de números reais para o número inteiro mais próximo, adequando o valor calculado a uma das possíveis mensagens da tabela de demodulação,  $f_{int}$  é a frequência de intervalo entre uma mensagem e outra e  $f_{menor}$  é a menor frequência associada a alguma mensagem.

### IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os principais elementos do circuito receptor estão apresentados na Tabela II. O microcontrolador utilizado foi o EK-TM4C123XL, de 32 bits e 3,3V, da família ARM Cortex-M4 Tiva C Series, fabricado pela Texas Instruments.

TABELA II  
COMPONENTES E VARIÁVEIS DO RECEPTOR

Fotodetector (PD)	PD333-3C/H0/L2	
Amplificador ATI	OPA380	
Resistor $R_{T1}$	120	k $\Omega$
Potenciômetro $R_{T2}$	0 - 100	k $\Omega$
Capacitor $C_T$	1	pF
Comparador COMP $C_p$	LM311	
$f_{C1}$	23	kHz
$f_{C2}$	1,1	MHz

No amplificador de transimpedância, o potenciômetro  $R_{T2}$  foi ajustado empiricamente em 72 k $\Omega$  para se obter a faixa de operação desejada.

Buscando reduzir os efeitos de reflexões externas, foi montado um ambiente revestido com material de baixo índice de reflexão para realização dos testes.

No primeiro teste, o receptor foi acoplado a um anteparo e mantido imóvel enquanto a fonte, constituída de um circuito capaz de gerar sinais VLC OOK-M-FSK alimentando uma luminária LED de 4 W, era deslocada de forma retilínea à sua frente, tal como esquematizado na Fig. 3, com ângulo 0°.

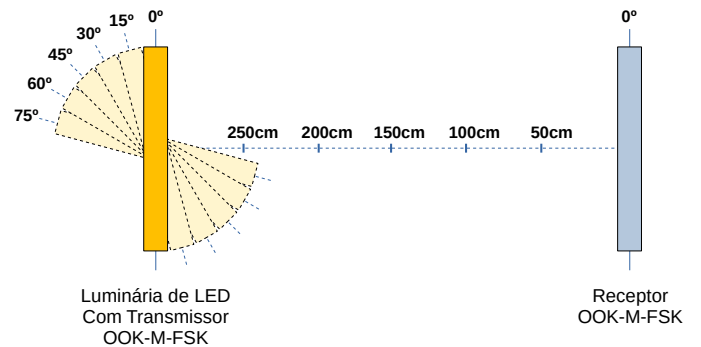


Fig. 3. Ambiente de ensaio

A Fig. 4 mostra as principais formas de onda no receptor a partir do sinal recebido a 50 cm da fonte.

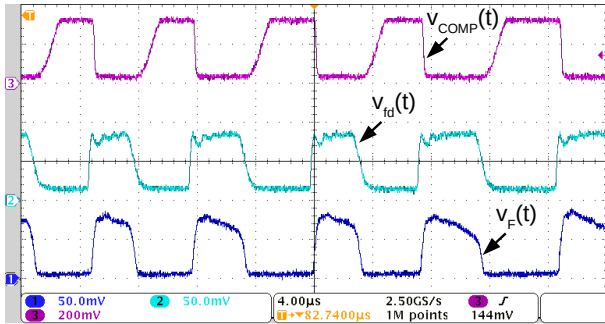


Fig. 4. Formas de onda do sinal recebido,  $v_{fd}(t)$ , do sinal filtrado,  $v_F(t)$ , e do sinal digitalizado,  $v_{COMP}(t)$ .

A Fig. 4 mostra a taxa de erros de bits (BER) para os índices de modulação (M)[5] 16 e 32, indicando que o algoritmo funciona bem para ambos os casos até aproximadamente 1 metro. Por outro lado, para distâncias maiores que este valor e  $M = 32$ , houve um aumento significativo na BER em virtude do decaimento da potência recebida e consequente diminuição da relação sinal ruído (SNR). No caso de  $M = 16$ , o sistema foi capaz de decodificar o sinal com uma BER reduzida em toda a faixa de distâncias estudada (0 a 3 metros).

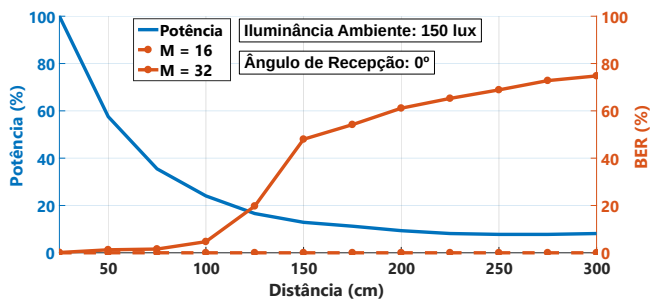


Fig. 5. Relação da BER com a distância em contraste com o decaimento de potência do sinal luminoso recebido

No segundo teste foi avaliado o efeito do ângulo entre a fonte e o receptor sobre a BER para  $M = 16$ . Ambos foram mantidos a distâncias fixas enquanto a fonte era rotacionada em ângulos específicos, como foi esquematizado na Fig. 3. Notou-se um decaimento menos acentuado da potência, resultando num efeito menos significativo sobre a BER em relação ao primeiro teste, como mostra a Fig. 6.

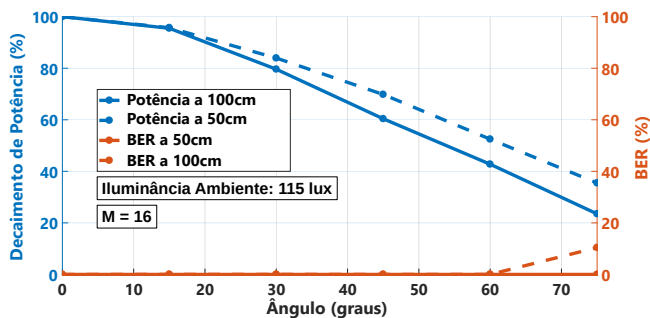


Fig. 6. Relação da BER com o ângulo entre receptor e transmissor em contraste com o decaimento de potência do sinal luminoso recebido

## V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a implementação de um receptor para sistemas de comunicação por luz visível baseados na modulação OOK-M-FSK. Os circuitos de condicionamento de sinal desempenharam corretamente sua função e a topologia proposta foi capaz de decodificar um sinal VLC com um valor reduzido da BER para índices de modulação  $M$  de até 32, distâncias de até 1 metro e ângulos de até 75 graus.

## AGRADECIMENTOS

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

## REFERÊNCIAS

- [1] S. Dimitrov and H. Haas, *Principles of LED light communications: towards networked Li-Fi*. Cambridge University Press, 2015.
- [2] 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.
- [3] C. S. Martins, "Comunicação óptica sem fios baseada em díodos emissores de luz branca," Master's thesis, 2011.
- [4] S. Rajagopal, R. D. Roberts, and S.-K. Lim, "Ieee 802.15. 7 visible light communication: modulation schemes and dimming support," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 3, pp. 72–82, 2012.
- [5] 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.