

## DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO VIA LUZ VISÍVEL UTILIZANDO MODULAÇÃO VPPM

## DEVELOPMENT OF A VISIBLE LIGHT COMMUNICATION SYSTEM USING VPPM MODULATION

## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DE LUZ VISIBLE MEDIANTE MODULACIÓN VPPM

Eduardo M. Viera<sup>1</sup>

Lucas A. Bonini<sup>2</sup>

Álysson R. Seidel<sup>3</sup>

**Resumo:** O presente trabalho visa apresentar o projeto e desenvolvimento de um sistema de comunicação via luz visível utilizando modulação VPPM. Afim de analisar o comportamento do sistema proposto, desenvolveu-se um protótipo capaz de transmitir dados via luz visível, em que possibilitou transmitir dados a uma taxa de 10 kbps a uma distância máxima de 14 cm. Também foram abordados os fatores limitantes do método de modulação VPPM, assim como possíveis alternativas para aumentar a distância entre fonte e receptor e elevar a taxa de transmissão de dados.

**Palavras-chave:** Modulação. VPPM. VLC. Transmissão. Comunicação.

**Abstract:** In this work is proposed a design and development of a communication system employing VPPM modulation to achieve visible light communication. In order to analyze the behavior of the proposed system, a prototype was developed, capable of transmitting data via visible light at a rate of 10 kbps at a maximum distance of 14 cm. This paper also addresses the limiting factors of the VPPM modulation method, as well as possible alternatives to increase the distance between the source and the receiver, and therefore raise the rate of data transmission.

**Keywords:** Modulation. VPPM. VLC. Streaming. Communication.

**Resumen:** El presente trabajo tiene como objetivo presentar el diseño y desarrollo de un sistema de comunicación a través de la luz visible utilizando la modulación VPPM. Para analizar el comportamiento del sistema propuesto, se desarrolló un prototipo capaz de transmitir datos a través de la luz visible, en el que será posible transmitir datos a una velocidad de 10 kbps a una distancia máxima de 14 cm. También discutimos los factores limitantes del método de modulación VPPM, así como las posibles alternativas para aumentar la distancia entre la fuente y el receptor y aumentar la velocidad de transmisión de datos.

**Palabras Clave:** Modulación. VPPM. VLC. Transmisión. Comunicación.

Envio: 20/04/2019

Revisão: 22/04/2019

Aceite: 05/07/2019

<sup>1</sup> Graduando. Universidade Federal de Santa Maria. [eduardomviera94@gmail.com](mailto:eduardomviera94@gmail.com). Bols. PROBIC - FAPERGS

<sup>2</sup> Graduando. Universidade Federal de Santa Maria. [lucasamorimbonini@gmail.com](mailto:lucasamorimbonini@gmail.com).

<sup>3</sup> Professor Doutor. Universidade Federal de Santa Maria. [seidel@ctism.ufsm.br](mailto:seidel@ctism.ufsm.br).

## Introdução

Desde os primórdios dos tempos, a luz já era utilizada como meio de comunicação, conforme apresentado em (SCHAF, 2018), *fire beacons* ou tochas de fogo serviam de alerta para grandes distâncias, a comunicação tem sido de grande importância, sendo uma ferramenta de integração, troca mútua de informações e desenvolvimento. As informações ao decorrer do tempo passaram de um simples carácter que poderia levar semanas, meses até anos para chegar ao seu destino, como cartas por exemplo e passando a ser um sistema mais complexo como um *streaming* de vídeo que é transmitido e recebido de forma imediata, graças ao advento da telefonia e da internet (Bonini, 2018).

Com o crescimento e ampliação das tecnologias de transmissão de dados na atualidade, houve também um grande impacto até mesmo nos hábitos da população mundial e alterou as diretrizes de diversas pesquisas científicas e produções tecnológicas. Conforme apresentado por (ST, 2018) a busca por uma maior portabilidade, forçou com que surgissem novas tecnologias de transmissão sem fio, sejam estas através de ondas de rádio frequência, ou até mesmo luz visível.

Atualmente existem diversas pesquisas relativas a métodos de transmissão de dados, dentre estas temos a transmissão de dados via luz visível (*Visible light communication-VLC*), conforme apresentado em (Bonini, 2018), este tipo de transmissão vem ganhando relevância e a atenção para sistemas de transmissão que agregam eficiência sob o aspecto de efetividade da comunicação associada a eficiência da iluminação. Os LEDs ao decorrer dos anos vêm substituindo os sistemas de iluminação tradicionais, e usá-los como meio de transição VLC é uma tendência muito forte devido a algumas características intrínsecas dos mesmos, como altas taxas de comutação.

Portanto, neste trabalho será apresentado o estudo de um sistema VLC a partir do desenvolvimento de um sistema de comunicação básico via luz visível. Ainda serão estudados, o funcionamento da transmissão VLC, o tipo de modulação utilizado para o trabalho desenvolvido, o projeto do módulo transmissor e receptor, e resultados experimentais.

## Sistemas de comunicação

Para ser considerado um sistema de comunicação, alguns fatores se fazem necessários, como a fonte que origina a mensagem, um transdutor de entrada que converte os dados em

sinais elétricos, o transmissor que modifica a banda base para melhor eficiência na transmissão, o canal ou meio por onde o transmissor envia a mensagem, o receptor que processa o sinal recebido e desfaz as modificações feitas pelo transmissor para que o transdutor de saída receba este sinal, o converta para sua forma original e chegue no destinatário final (LATHI, 1998).

Em redes de computadores existem diversos modelos de comunicação, incluindo o modelo OSI (*Open System Interconnection*) que faz uso de 7 camadas, em que cada uma possui um protocolo e funcionalidade particular; o modelo TCP (*Transmission Control Protocol*) em que a camada física tem relação direta com o canal de transmissão; E a tecnologia (*Wireless Fidelity*), regulamentada em 1985, utilizando o espectro de rádio em 900 MHz, 2,4 GHz, e mais recentemente 5,8 GHz. Em 1997, como forma de padronizar os equipamentos já existentes, surge o protocolo padrão 802.11 – desenvolvido em conjunto com o *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE). A nova tecnologia foi promovida então com o nome de *Wi-Fi*, e sem dúvidas atualmente é a tecnologia de transmissão de dados mais usual no mundo, tanto em atividades pessoais quanto profissionais (Bonini, 2018).

Embora todas as vantagens provindas da tecnologia *Wi-Fi* ainda existem alguns fatores limitantes para estes sistemas. Para que um dispositivo possa transmitir em radiofrequência é necessário que se faça um licenciamento, além de que no espectro de rádio as frequências só podem variar de kHz a GHz (Matheus *et al*, 2017). Outro fator importante a ser salientado é a segurança dos sinais transmitidos, já que não é simples de confina-los em um local fechado. Nesse contexto, surgem outras formas de sistemas de comunicação, afim de complementar determinadas carências provindas do sistema *Wi-Fi*.

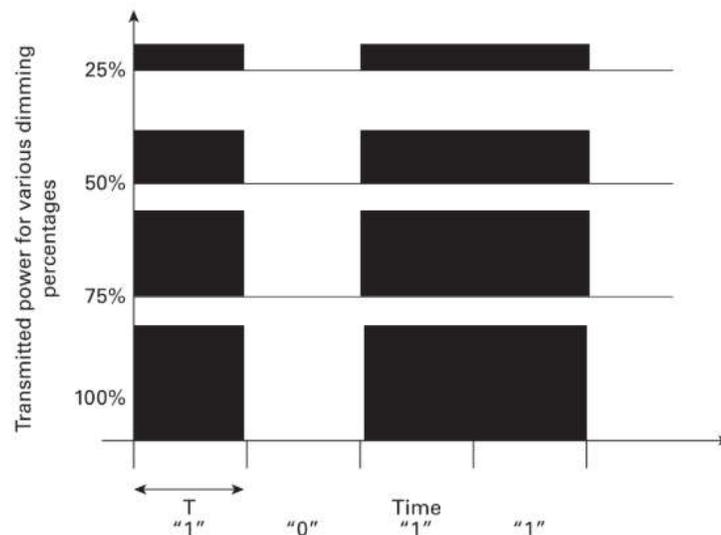
O sistema *Optical Wireless Communications* (OWC) é o nome dado para comunicação a partir da faixa de operação que utiliza luz infravermelha, luz visível e até luz ultravioleta. Dentro destes conceitos, o físico alemão Harald Hass define o termo *Li-Fi* (*Light Fidelity*), como um sistema completo de comunicação sem fio via luz (ST, 2018). Os sistemas VLC são, portanto, englobados pela definição de Hass para *Li-Fi*.

Diferente de um sistema *Wi-Fi* que atinge frequência de até GHz, em sistemas VLC pode-se atingir frequências de até THz. Ainda pode-se salientar que ao contrário do infravermelho e ultravioleta, que podem apresentar perigo para a saúde humana, o espectro da luz visível não apresenta nenhum perigo (Matheus *et al*, 2017).

As atividades com VLC levaram a uma padronização denominada IEEE 802.15.7. Este padrão determina que a comunicação por VLC deve suportar o escurecimento (redução do fluxo luminoso), sem que haja problemas na comunicação. Também é especificado que a técnica de modulação aplicada não pode causar nenhum tipo de oscilação perceptível pela visão humana (*flickering*). Para isso é importante fazer uso de técnicas de modulação, como *On-Off keying* (OOK). *Code Shift Keying* (CSK), *Pulse Position Modulation* (PPM), *Variable Pulse Position Modulation* (VPPM), e *Inverse Pulse Position Modulation* (IPPM) ente outros que não serão abordadas neste trabalho, estes métodos são melhor especificados em (ARNON, 2015).

A modulação OOK, ilustrada na Figura 1, consiste na transmissão de um sinal binário com largura de banda fixa, em que existem dois níveis lógicos, “0” para quando não se tem nenhuma potência no sistema de iluminação e “1” para quando tenha potência no sistema de iluminação (ARNON, 2015).

Figura 1-Exemplo de um sistema de modulação OOK



Fonte: (ARNON:2015)

O sistema de modulação CSK utiliza combinação de cores para transmissão de dados, isso é possível através do uso de LEDs do tipo RGB na iluminação. Portanto esse sistema pode

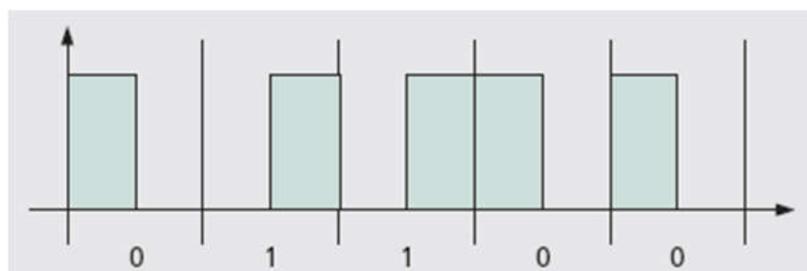
transmitir dados pela própria cor e assim a intensidade da fonte de iluminação pode ser constante. Entretanto a grande desvantagem deste sistema é a sua elevada complexidade do transmissor e receptor (GEORGE et al., 2014).

A modulação PMM ou modulação por posição de pulso, é um sistema de comunicação convencional em que a duração do símbolo é dividida em intervalos de tempo iguais, e um determinado número de pulsos é transmitido nesse intervalo de tempo. Portanto, a informação é identificada através da posição de cada pulso. A fácil implementação do PPM facilitou para que esta se tornasse muito popular em técnicas para comunicação óptica. Entretanto como este tipo de modulação permite um aumento da constelação acaba por diminuir a eficiência espectral, tornando-se assim um método inadequado para transmissão em alta frequência (NOSHAD, 2013). A partir do método PPM surgiram outros tipos de modulação, dentre eles o VPPM.

Além de transmissão de dados o método VPPM ainda contempla com o processo de dimerização do sistema de iluminação. Além do PPM este método também dispõe de características de Modulação por Largura de Pulso (PWM), afim de proporcionar a característica de dimerização (MATHEUS *et all*, 2017). O método VPPM consiste em altear a largura de pulso em resposta ao nível de escurecimento escolhido e simultaneamente modular o sinal variando a posição entre cada pulso afim de codificar cada bit. Os sinais recebidos, conforme Figura 2, são decodificados através da análise da posição de cada pulso.

74

Figura 2 - Sinal VPPM recebido



Fonte: Adaptado de (S. RAJAGOPAL, 2012)

Conforme apresentado na Figura 2, em um sistema VPPM quando o pulso está posicionado a direita da janela, ou seja a borda de subida do sinal é identificado no tempo inicial

de cada janela, é determinado que o nível lógico do bit é '0', quando a borda de subida do pulso é identificada em um tempo qualquer da janela, é denominado que o nível lógico do bit é 1.

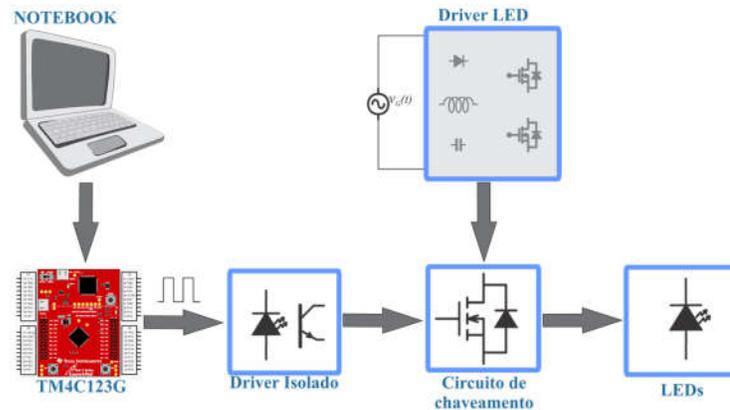
Para que seja possível realizar transmissão de dados utilizando VLC, faz-se necessário o uso de um sistema de iluminação. Dessa forma, desenvolveu-se um protótipo capaz de simular um sistema de comunicação, com transmissão e recepção de dados, através de luz visível utilizando modulação VPPM.

### **Transmissor e receptor VLC desenvolvido.**

Como neste trabalho o objetivo da comunicação por luz visível não é atingir altas taxas de transmissão, optou-se por implementar um sistema com modulação VPPM. Essa modulação permite não só transmitir dados, mas também realizar a dimerização do sistema de iluminação de forma simultânea à transmissão de dados. A taxa de dados escolhida foi de 10 kbps, já que a taxa de comutação de *Drivers* para LED com alta eficiência são usualmente limitados por algumas dezenas de kbps – devido à faixa de frequência de operação dos transistores.

O sistema da Figura 3 é composto por um computador – responsável por gravar o código de transmissão na plataforma de desenvolvimento TM4C123G desenvolvida pela Texas Instruments – responsável por enviar o sinal para o *driver* isolado, em que o nível de tensão será elevado a um nível adequado para realizar a comutação das chaves no circuito de comutação. Por fim o circuito de comutação – no qual será modulada a tensão de barramento do circuito de alimentação, desta forma os LEDs irão oscilar transmitindo um sinal modulado o qual será captado com um circuito receptor.

Figura 3 - Diagrama representativo empregado para transmissão VLC

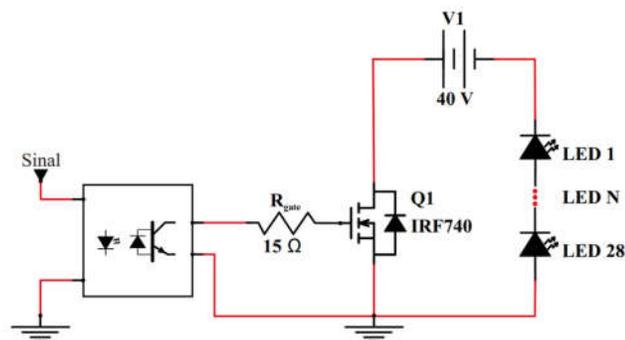


Fonte: Elaborada pelo autor

Para este trabalho optou-se por transmitir um *frame* com 24 bits, que ao aplicar o código de linhas, gera-se 36 bits complementares de transmissão, sendo 6 bits para cabeçalho e 6 para rodapé. O restante dos 24 bits é composto por informação irrelevante ou *payload*. Esses números foram escolhidos com base no código RLL 4B6B, podendo gerar combinações de caractere reservado para identificar de forma padrão o início e o fim de um *frame*.

Como neste trabalho não irá abordar o dimensionamento de *drivers* para VLC para obter melhor eficiência energética e/ou largura de banda, foi empregado para alimentação dos LEDs o circuito Figura 4, em que se optou pelo uso de um MOSFET IRF740 (Q<sub>1</sub>) a fim de realizar a comutação no barramento de saída de uma fonte de corrente contínua (V<sub>2</sub>) de 40 V.

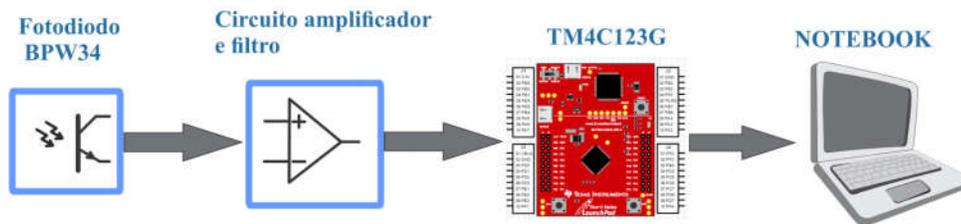
Figura 4- Circuito de comutação para acionamento dos LEDs



Fonte: Elaborada pelo autor

O diagrama receptor VLC é mostrado na Figura 5, o qual apresenta a forma como o sinal é recebido. O sinal é recebido por um fotodiodo, amplificado, filtrado e processado pelo microcontrolador (UC). Este sinal já processado é enviado para o *notebook* no qual é possível visualizar o sinal transmitido.

Figura 5-Diagrama representativo empregado para recepção VLC

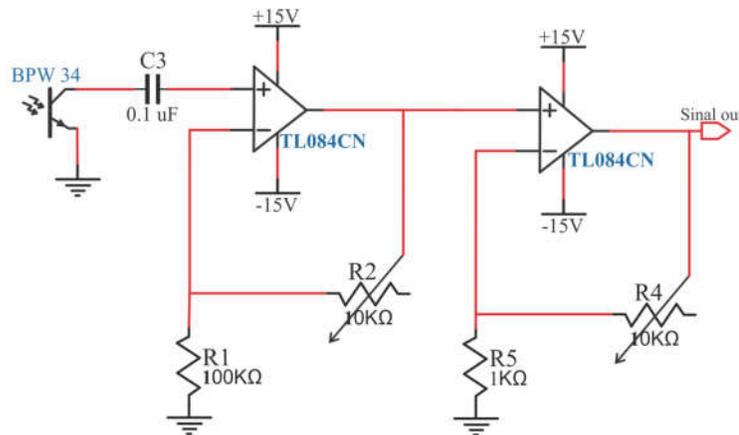


Fonte: Elaborada pelo autor

O fotodiodo utilizado BPW34 é capaz de captar ondas de 430 até 1100 nanômetros, sabendo que o espectro de luz visível varia de aproximadamente 400 até 700 nanômetros, sendo assim viável para este trabalho.

A fim de remover o *offset* e interferências provenientes de iluminação externa – a qual para um sistema VLC é uma das principais causadoras de ruído, desenvolveu-se um circuito conforme é mostrado na Figura 6, sendo capaz de filtrar e amplificar o sinal capturado pelo fotodiodo. Este circuito foi desenvolvido com topologia não inversora, o capacitor C1 atua como um filtro passa altas a fim de remover o nível CC (*offset*) do sinal.

Figura 6- Circuito amplificador/filtro VLC.



Fonte: Elaborada pelo autor

O circuito amplificador desenvolvido é sensível a variação da distância entre transmissor e receptor, para controle é realizado em malha aberta o que resulta em uma grande variação do nível de tensão na saída de acordo com a distância do receptor e outros fatores geométricos. Podemos ainda salientar que a interferência de lâmpadas fluorescentes ou incandescentes carregam uma frequência de portadora de 100 a 150 Hz, com frequência dominante/significativa de aproximadamente 100 Hz (ADIONO; FUADA, 1990).

A luz modulada e recebida pelo fotodiodo BPW34 gera um sinal de aproximadamente 50 $\mu$ A, devido a esta baixa amplitude do sinal optou-se por utilizar um circuito amplificador de segunda ordem para evitar que o circuito trabalhe próximo a zona de saturação dos Amp-Ops.

O sinal já filtrado e amplificado é recebido pelo microcontrolador em que utiliza um registrador *Analog comparator* disponível na plataforma Tiva C. A lógica de funcionamento do sistema de leitura do receptor consiste em comparar um sinal de entrada S1 que pode ser selecionado em um nível de 0 até 3,3 V, portanto é comparado dois sinais analógicos de entrada, sendo S1 o sinal de referência e S2 o sinal lido na saída do filtro. Se o sinal S1 for maior que S2 é gerado internamente um bit '1', caso S1 seja menor que S2 bit '0'.

Como o sinal emitido pelo transmissor é muito semelhante a um *Pulse Width Modulation* (PWM), pode-se detectar as bordas de subida e descida dos sinais através do sistema de comparação e através do registrador *Interrupt* pode-se determinar o que deve ser feito caso a borda seja de subida ou descida.

O código para transmissão desenvolvido é compilado na Plataforma Tiva C, em que o código gera um padrão de bits previamente estabelecidos na Tabela 1, em que na primeira sequência de bits temos um cabeçalho, em seguida a informação transmitida e por último outra sequência de bits conhecida que demarca o fim de um pacote. A partir dos bits gera-se o sinal modulado que por sua vez é transmitido ao circuito de transmissão através dos pinos de saída da plataforma Tiva C.

Tabela 1- Bits selecionados para transmissão

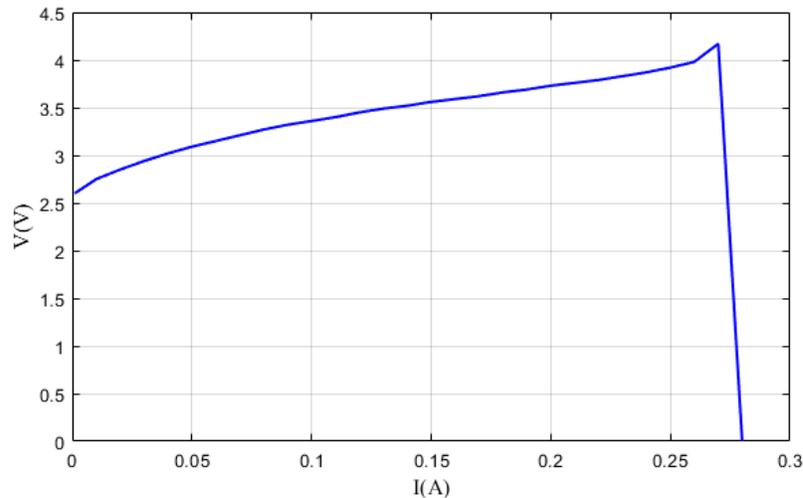
<b>010101</b>	<b>Cabeçalho</b>
<b>110100</b>	Informação
<b>110010</b>	
<b>100101</b>	
<b>011010</b>	
<b>011100</b>	Rodapé

### Resultados obtidos

Para fins de iluminação e transmissão de dados é de suma importância considerar a curva característica dos LEDs em questão, afim de que se consiga trabalhar na tensão e corrente nominal sem causar danos ao dispositivo. Como neste trabalho foram utilizados LEDs retirados de luminárias comerciais fez-se necessário realizar o levantamento da curva característica já que esta não era fornecida pelo fabricante da luminária em questão.

Os dados necessários dos LEDs foram obtidos através da variação da corrente  $I_{DC}$  na ordem de 10 mA e com isso realizou-se a obtenção das tensões, obtendo-se 30 amostras de corrente e tensão Figura 7. Estes valores foram gerados a partir de uma média realizada entre os resultados obtidos em 4 LEDs da mesma luminária, em que observamos que o ponto de ruptura dos LEDs ocorre em torno da potência de aproximadamente 1.12 W.

Figura 7- Gráfico de tensão por corrente dos LEDs utilizados no sistema VLC.

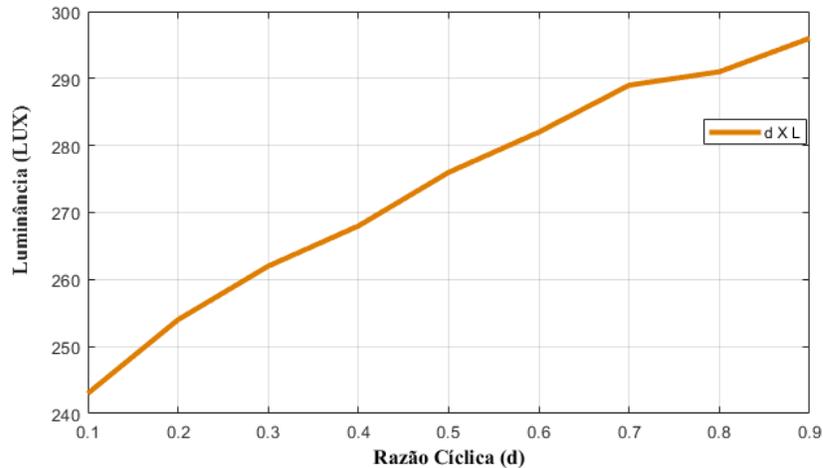


Fonte: Elaborada pelo autor

Levando em consideração a curva apresentada na Figura 7, foi possível se projetar um circuito capaz de operar na potência nominal dos LEDs e também efetuar a técnica de dimerização para alteração da potência luminosa através da variação da razão cíclica.

Como a variação do fluxo luminoso, proveniente da técnica de dimerização, pode acarretar em problemas na transmissão de dados, é interessante fazer uma análise que relacione a luminância com a razão cíclica aplicada no sistema de comutação. Assim, variando-se a razão cíclica, a luminância foi medida com o auxílio de um luxímetro. O receptor foi substituído pelo luxímetro, mantendo-se uma distância fixa entre a fonte e receptor de 10 cm, para que as únicas variáveis fossem a luminância e a razão cíclica. Com isso se obteve uma curva que relaciona a luminância pela razão cíclica, apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Relação da luminância pela razão cíclica

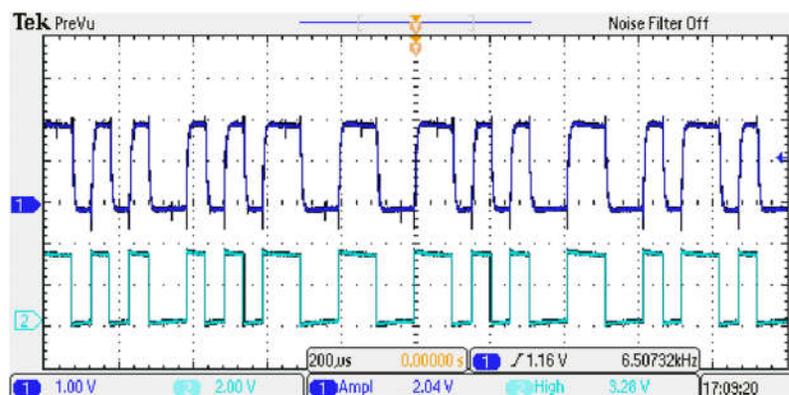


Fonte: Elaborada pelo autor

Tendo em vista a relação da luminância com a razão cíclica, fez-se um comparativo entre o sinal transmitido pelo UC transmissor e recebido no UC receptor Figura 9. Com os sinais sobrepostos e em escala menor Figura 10, é possível se observar a existência de um efeito de passa-baixas entre os sinais. Esse efeito é causado principalmente pelo filtro amplificador e implica diretamente em limitações na frequência de transmissão e na razão cíclica do sinal VPPM transmitido.

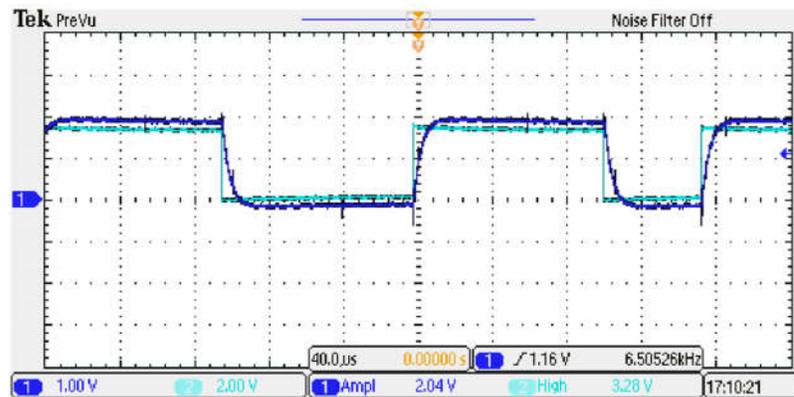
81

Figura 9 - Sinal de transmissão e recepção com razão cíclica em 50%.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10 - Sinal de transmissão e recepção com em escala reduzida.



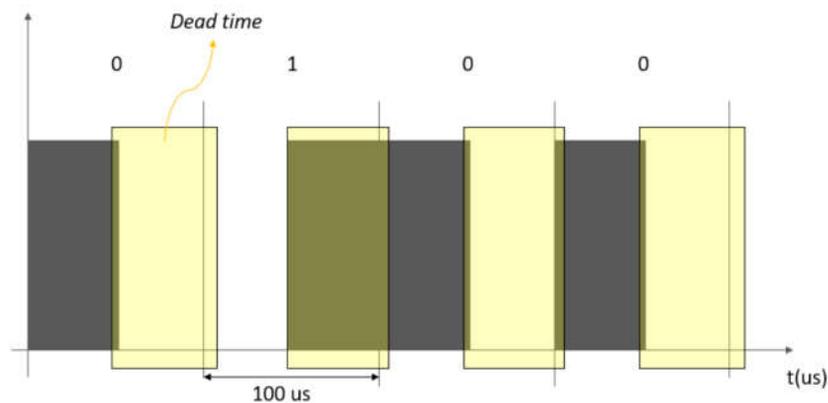
Fonte: Elaborada pelo autor

Devido a esse amortecimento aparente nas bordas de subida e descida, a decodificação e sincronia começam a apresentar falhas e, para uma razão cíclica elevada, esse efeito pode acarretar no encontro das bordas de subida de um sinal com a de descida do outro.

82

Para a detecção das bordas de subida e descida do sinal recebido, sem que ocorresse problemas na identificação durante as bordas de transição, se adiciona um tempo morto capaz de cancelar a detecção das boras em início de janela, como mostra a Figura 11. Dessa forma, o microcontrolador realiza a leitura apenas da borda que equivalem a um dado válido.

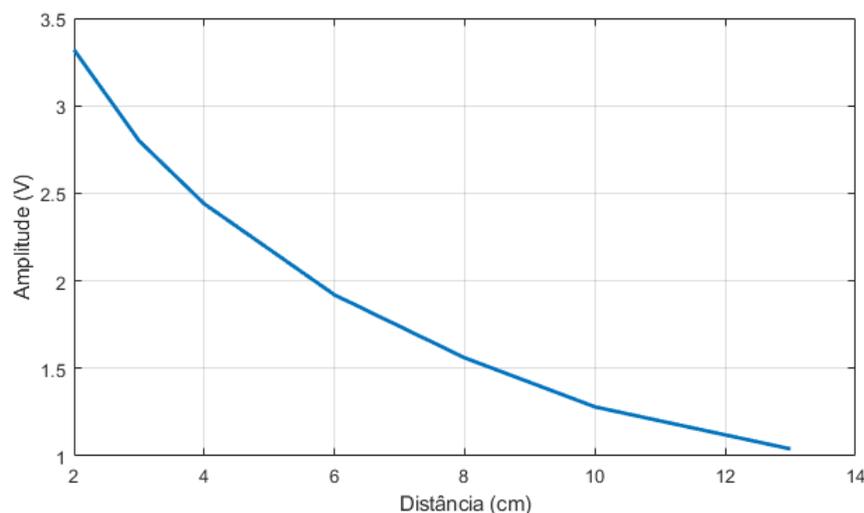
Figura 11 - Apresentação do tempo morto em um sinal transmitido.



Fonte: (Bonini, 2018)

A fim de medir a distância máxima que o sistema VLC proposto pode transmitir sem apresentar perdas consideráveis, optou-se por variar a distância ( $d$ ) entre o conjunto de LEDs e o fotodiodo. A razão cíclica foi fixada em 50% e mediu-se a tensão ( $V$ ) na saída do filtro. Com isso foi obtida a curva da distância pela tensão de saída apresentada na Figura 12.

Figura 12-Tensão de recepção pela distância entre fonte/receptor



Fonte: Elaborada pelo autor

Ao analisar estes resultados, podemos observar um comportamento não linear, com característica exponencial. Esse comportamento é modelado pela Equação 1. Em termos práticos, o protótipo desenvolvido tem uma potência de 14 W, que é relativamente baixa para o uso em aplicações nas quais a distância entre fonte e receptor são maiores do que alguns centímetros.

$$Amplitude(d) = 3,75e^{(-0,20 d)} + 0,78 \quad (1)$$

No entanto, em sistemas de iluminação comerciais, as potências são consideravelmente mais elevadas e assim também as distâncias de transmissão (KARUNATILAKA *et al.*, 2015). Além disso, o sistema funciona em malha aberta, com ganho fixo. A troca por um amplificador em malha fechada poderia aumentar consideravelmente a distância de transmissão.



## Conclusão

Para o desenvolvimento deste trabalho, além da construção de um protótipo capaz de transmitir dados via luz visível, foram realizados testes e simulações nos quais foi possível obter uma série de informações sobre taxa de operação, permitindo análise de modos de operação e de características específicas do sistema.

A partir das análises e testes desenvolvidos observou-se que devido a limitação dos componentes utilizados no circuito de comutação e das limitações do filtro receptor, o protótipo pode trabalhar a uma taxa máxima de 10 kbps e uma distância de 14 centímetros entre fonte e receptor, sem perdas de informação.

O protótipo foi implementado a fim de operar em modulação VPPM, permitindo não só a transmissão de dados, mas também a dimerização do sistema de iluminação. Com o sistema implementado, se observou que, devido às características de funcionamento do VPPM, o sistema precisa operar em uma faixa de razão cíclica limitada para manter a sincronia e também controlar a potência da lâmpada. Para que não haja sobreposição de bordas de subida e descida dos sinais emitido e recebido, se adiciona um tempo morto que cancela a detecção das bordas no início da janela de leitura.

O fotodiodo BPW 34 utilizado neste trabalho apresentou características adequadas para trabalhar no espectro de luz visível. Porém, com o filtro amplificador operando em malha aberta, o protótipo se mostrou inadequado para operar em locais em que ocorra grande variação da distância entre fonte e receptor. Em aplicações em que a distância entre fonte e receptor é fixa, o sistema apresenta bom funcionamento.

Para trabalhos futuros, propõem-se estabelecer um sistema de filtros em malha fechada e um sistema de comutação, em que ambos possam operar com faixas de frequência mais altas, permitindo que o sistema opere com taxas de operação mais elevadas. Além disso, aplicar o sistema em diferentes topologias de drivers para LED e analisar o impacto que o sistema VLC causa na eficiência do circuito.

### Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer o CNPq e FAPERGS. Este trabalho foi financiado pelo governo brasileiro através do programa CNPq proc. 313338/2018-3, 409632/2016-3.

### Referências

- ADIONO, Trio; FUADA, Syifaul. Investigation of Optical Interference Noise Characteristics in Visible Light Communication System. [s. l.], v. 126, n. 126, 1990.
- ARNON, Shlomi. **Visible Light Communication**. [s.l: s.n.].
- BELL, Alexander Graham et al. Discussion on of the photophone and the conversion of radiant nergy into Sound. **J. Soc. Telegraph Engineers**, [s. l.], v. 9, n. 34, p. 375–383, 1880.
- BONINI, Lucas. Estudo e desenvolvimento de um sistema de comunicação via luz visível para transmissão de dados via microcontroladores. Santa Maria. p. 12-55, 2018.
- KARUNATILAKA, Dilukshan et al. LED Based Indoor Visible Light. Communications: State of the Art. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, [s. l.], v. 17, n. 3, p. 1649–1678, 2015.
- LATHI. Modern Digital and Analog Communication Systems. Third Edit ed. [s.l: s.n.].
- MATHEUS, Luiz and Borges, Alex and Freire, Jean and Vieira, Luiz and Vieira, Marcos and Gnawali, Omprakash. Comunicação por Luz Visível: Conceitos, Aplicações e Desafios. p.247-296, 2017.
- SCHAF, Frederico Menine. Redes *Industriais*. 12 mar. 2018, 03 jul. 2018. Notas de aula.
- ST, Asoke Nath. Latest advancement in Light Fidelity (Li-Fi) Technology International Journal of Advance Research in Latest advancement in Light Fidelity (Li-Fi) Technology. [s. l.], n. January, 2018. STEPNIAK.