

Pré-Ênfase Utilizando Modulação por Largura de Pulso Aplicada a Sistemas de Comunicação por Luz Visível

João Paulo Brum*, Vitalio A. Reguera**, Lucas Teixeira**,
Felipe Loose**, Marco A. Dalla Costa**

* Engenharia de Telecomunicações, UFSM-RS, (e-mail:
joaobrum@gedre.ufsm.br).

** GEDRE - Inteligência em Iluminação, UFSM-RS

Abstract: In this paper we address the bandwidth limitation presented in phosphor-layered LEDs, which use this layer to generate the white color and are preferred by the industry due to the low cost of production. It is noteworthy that the frequency response of this semiconductor device is between 2 and 3 MHz, limiting the transmission data rate when used in visible light communication systems. Using an On-Off signal, a pre-emphasis technique is proposed using pulse-width modulation (PWM), considering a fixed signal-to-noise ratio, to reduce the inter-symbolic interference when transmitting at frequencies above the cut-off frequency of the LED. A measure of the Q factor of the signal using eye diagram was employed, which allows the direct assessment of the system error rate. Finally, a bit error rate below 10^{-6} was achieved at a data rate of 36 Mbps, which is considerably higher than the data rate achieved by original system under identical signal quality conditions.

Resumo: Neste artigo, aborda-se a limitação de largura de banda apresentada nos LEDs dopados com uma camada de fósforo, os quais usam essa camada para gerar a cor branca e atualmente são preferidos pela indústria devido ao baixo custo de produção. Nota-se que a resposta em frequência deste dispositivo semicondutor esteja entre 2 e 3 MHz, limitando a taxa de transmissão de dados quando usada em sistemas de comunicação de luz visível. Usando um sinal On-Off, uma técnica de pré-ênfase é proposta através de uma modulação por largura de pulso (PWM), considerando uma relação sinal-ruído fixa, para reduzir a interferência inter-simbólica ao transmitir em frequências acima da frequência de corte do LED. Foi empregada uma medida do Fator Q do sinal usando o diagrama de olho, que permite a avaliação direta da taxa de erro do sistema. Finalmente, uma taxa de erro de bit abaixo de 10^{-6} foi alcançada com uma taxa de dados de 36 Mbps, que é consideravelmente mais alta do que a taxa de dados alcançada pelo sistema original sob condições de qualidade de sinal idênticas.

Keywords: LED; Pre-emphasis; PWM; Error Rate; Data Rate.

Palavras-chaves: LED; Pré-ênfase; PWM; Taxa de erros; Taxa de dados.

1. INTRODUÇÃO

Visible Light Communication (VLC) é uma tecnologia que vem se tornando cada vez mais um tópico de pesquisa em sistemas de iluminação artificial. Destaca-se o uso de fontes de luz não apenas para fins de iluminação, mas também para comunicações digitais. Nesse contexto, utiliza-se uma parcela do espectro eletromagnético na faixa da luz visível para transmissão de dados, através da tecnologia de diodos emissores de luz (LEDs). Esse semicondutor possui grande vantagens em relação à temperatura de cor e vida útil, quando comparada com as lâmpadas incandescentes e fluorescentes (Schratz et al., 2016). Além disso, emergem semicondutores que permitem a comutação rápida de dispositivos de potência (Komine and Nakagawa, 2004), podendo ser adequado ao desenvolvimento da comunicação

por possibilitar taxas de dados suficientemente altas. Dessa forma, através da modulação por intensidade luminosa, ou seja, variações na corrente instantânea do LED, é possível enviar dados e recebê-los através de um receptor sensível à luz, composto por um fotodiodo e um amplificador adequado.

Atualmente, junto com essa tecnologia, existem algumas vantagens interessantes, por exemplo:

- Confinar um link em um ambiente fechado, sendo possível que cada ambiente tenha sua própria comunicação, sem causar interferência em ambientes adjacentes;
- Segurança de dados, já que a luz não atravessa paredes;
- Reutilização de sistemas de iluminação elétrica atual.

Para que a tecnologia de VLC se torne cada vez mais comum na sociedade, e também comercializável, existem

* Projeto com apoio financeiro através do Programa PIBIC CNPq N° 043402.

diversos desafios na indústria, desde a escolha de um circuito de acionamento adequado até à utilização de LEDs brancos que são construídos baseados na adição de uma camada de fósforo (Schubert, 2006), devido ao baixo custo de produção. Entretanto, com a utilização desse dispositivo para iluminação de estado sólido, surge uma limitação do sistema no cenário do transmissor, visto que a camada de fósforo naturalmente possui uma resposta lenta e apresenta uma queda de $-3dB$ na faixa dos 2 a 3 MHz (Pathak et al., 2015). Consequentemente, sistemas que utilizam modulações liga-desliga em banda base, terão sua taxa de dados limitada pelo dobro da largura de banda, ou seja, entre 4 e 6 Mbps.

A partir disso, esse trabalho tem como objetivo uma proposta de pré-ênfase através da largura do pulso de uma Modulação Liga-Desliga (*On-Off Keying* - OOK) no próprio transmissor, compensando as perdas no canal. Essa técnica já foi aplicada em comunicações limitadas por respostas RC em circuitos integrados, conforme o trabalho de Schinkel et al. (2005). Com a utilização da proposta, é possível diminuir a Interferência Inter-simbólica (*Intersymbol Interference* - ISI) e consequentemente aumentar consideravelmente a Taxa de Erro de Bit (*Bit Error Rate* - BER) do sistema para uma determinada Razão Sinal-Ruído (SNR).

Este artigo está organizado da seguinte maneira: A seção 2 descreve a limitação do sistema, a qual engloba a resposta em frequência do LED branco dopado com uma camada de fósforo. Na seção 3, há a explicação da técnica proposta e o cálculo da BER a partir do diagrama de olho do sinal. A seção 4 apresenta os resultados obtidos. Por fim, na seção 5 são expostas as conclusões dos autores.

2. LIMITAÇÃO DO SISTEMA

No cenário de iluminação, há 2 principais tipos de LEDs brancos que são utilizados na indústria. Um deles, é o LED azul dopado de uma camada de fósforo. Quando esse é excitado com uma corrente elétrica, a luz azul é emitida e parte dela é absorvida pela camada do material, gerando uma luz amarela, e assim, a combinação de ambas formam a iluminação branca.

O outro tipo de LED fabricado é o de 3 cores, ou seja, através da combinação primária do azul, vermelho e verde, obtém-se a luz branca na saída. Atualmente, a preferência da indústria é através do LED branco dopado com uma camada de fósforo, devido ao baixo custo de produção (Zukauskas et al., 2002). Entretanto, a natureza do fósforo quando feita a conversão para luz é muito lenta em relação ao semicondutor, e acaba limitando a largura de banda do sistema em alguns MHz (Pathak et al., 2015), visto que o tempo de resposta é inferior ao LED.

Através da Figura 1, é possível visualizar a resposta em frequência de um LED comercial de alto brilho (10mm), de cor branca devido à camada com fósforo, o qual possui o ponto de -3 dB em 2.12 MHz.

Considerando a resposta do canal de VLC na ordem de GHz, e a resposta do receptor muito acima da frequência de corte do LED, modela-se a resposta completa do sistema, limitado pelo transmissor, como um circuito de

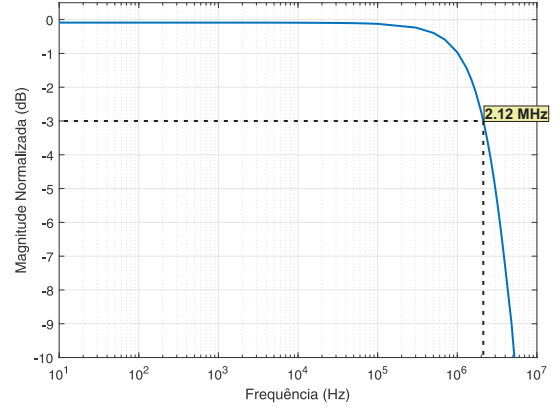


Figura 1. Resposta em frequência de um LED comercial. primeira ordem, do tipo passa baixas RC. A resposta do modelo no domínio no tempo pode ser descrita como:

$$h_{LED}(t) = e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (1)$$

Quando analisado na frequência ω , a função de transferência do circuito é:

$$H_{LED}(\omega) = \frac{1}{RCj\omega + 1} \quad (2)$$

em que, $1/RC$ também é chamada de frequência de corte do LED (f_C), a qual é considerada nesse trabalho 2.12 MHz e obtida através de resultados experimentais.

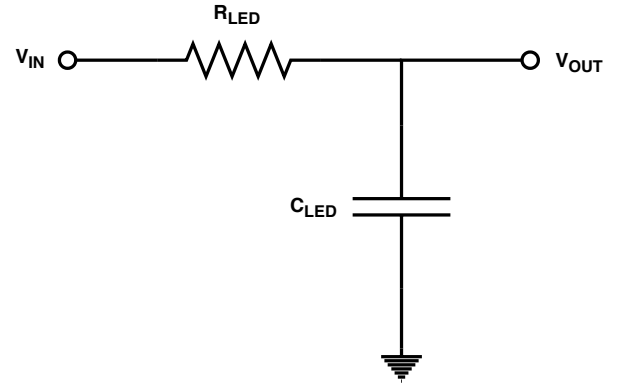


Figura 2. Modelo do sistema, representado como um circuito passa baixas do tipo RC.

Baseado nessa motivação e modelagem, surgem estudos que possibilitam a ampliação da largura de banda do dispositivo, através de equalização analógica, digital ou física (Teixeira et al., 2019). Na seção seguinte, é proposta uma equalização no transmissor, chamada de pré-ênfase.

3. TÉCNICA PROPOSTA

3.1 Pré-Ênfase por Modulação de Largura de Pulso

A modulação OOK é uma das especificadas no padrão IEEE 802.15.7 (Standard, 2011) e é considerada um dos esquemas mais simples para transmitir dados através da

luz, visto que é uma transmissão binária, a qual o LED permanece ligado durante a transmissão de um bit "1" e é desligado durante a transmissão de um bit "0". Além da baixa complexidade, essa modulação possui taxa de dados R_b limitada ao dobro da largura de banda, visto que é transmitida em banda base. Entretanto, quando um sinal com largura de banda BW for maior que a f_C do LED, começa a surgir interferência inter-simbólica, devido ao espalhamento do pulso no tempo. Essa característica de ISI é um dos principais limitantes para alcançar uma alta taxa de dados do sistema, limitando-a ao dobro da largura de banda do transmissor. Ao analisar a taxa de erro de bit de uma transmissão, quanto maior BW, maior a BER, comprometendo o sistema para transmissões mais rápidas.

Dessa forma, de acordo com o trabalho de Schinkel et al. (2005), o qual aplica uma Modulação por Largura de Pulso (*Pulse-Width Modulation* - PWM) como forma de pré-ênfase (PE) em um canal com característica RC, é possível aumentar consideravelmente a taxa de dados do sistema. A partir disso, esse trabalho tem como objetivo equalizar o canal VLC (limitado pelo LED) através de uma modulação PWM para diminuir a ISI e consequentemente alcançar taxas significativamente maiores que a limitada pela largura de banda do LED (2.12 MHz), com uma BER aceitável para aplicações em links ópticos (Le Minh et al., 2008).

Na Figura 3 é possível ver a transmissão de um sinal OOK convencional, a transmissão de um sinal com codificação Manchester, e finalmente a modulação PWM. O *duty cycle* (D) de um sinal PWM-PE em 100% corresponde à uma transmissão convencional OOK, e com 50% corresponde à uma transmissão Manchester. A escolha de um D ótimo irá depender das características empregadas no canal, variando com BW.

Através do padrão de transmissão, é possível equacionar a transmissão da PWM-PE (Schrader et al., 2006), definida na Eq. 3:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} u_n p(t - nT_s) \quad (3)$$

onde $u_n \in \{0,1\}$, descrito como um sinal aleatório e equiprovável. Além disso, T_s é o tempo da duração do símbolo, e $p(t)$ é o formato do pulso. Para o símbolo do bit "1", o formato do pulso é definido como:

$$p_1(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < DT_s \\ 1, & DT_s \leq t < T_s \end{cases} \quad (4)$$

Para o símbolo do bit "0", assume-se um formato antípodo:

$$p_0(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < DT_s \\ 0, & DT_s \leq t < T_s \end{cases} \quad (5)$$

onde D é o *duty cycle* do pulso, limitado entre 0.5 e 1.

Na Figura 4 exemplifica-se a transmissão de um símbolo com largura de banda de 6 MHz, a qual possui um T_s de

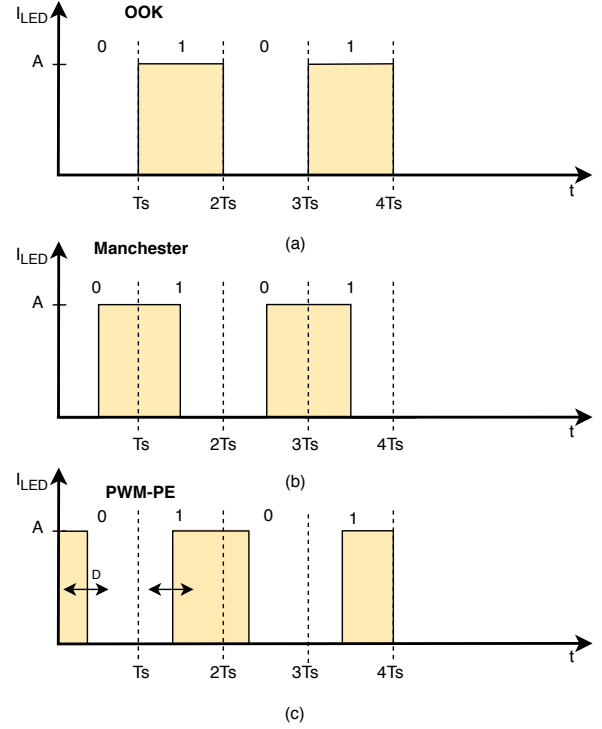


Figura 3. (a) Forma de onda de um sinal OOK; (b) Forma de onda de um sinal codificado com Manchester; (c) Forma de onda da PWM-PE.

83.33 ns. É possível ver que o símbolo em linha tracejada e com pré-ênfase tem uma resposta no canal muito mais rápida que a linha contínua, encurtando a sua duração e assim, consequentemente, diminuindo a ISI para a mesma largura de banda.

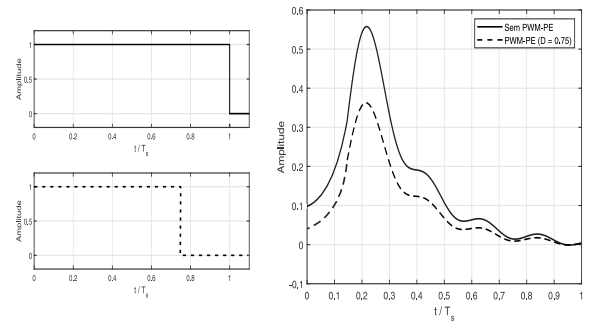


Figura 4. Exemplo da resposta do canal para 2 pulsos, sem e com pré-ênfase.

Por conseguinte, através da resposta do canal, é possível obter uma equação teórica para a obtenção do D ótimo que resulta em um sinal com ISI zero utilizando a variação da taxa de dados. Essa equação foi deduzida no trabalho de Schinkel et al. (2005) e seu resultado final é:

$$D_{opt} = \ln\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}e^{\frac{RC}{R_b}}\right) \frac{R_b}{RC} \quad (6)$$

onde o tempo de resposta do canal é considerado como RC, que denomina a frequência de corte do LED.

Conforme exemplificado na Figura 5, quanto mais R_b é aumentada, maior é a necessidade de BW e mais pré-ênfase deve ser aplicada, aproximando-se do limite 0.5.

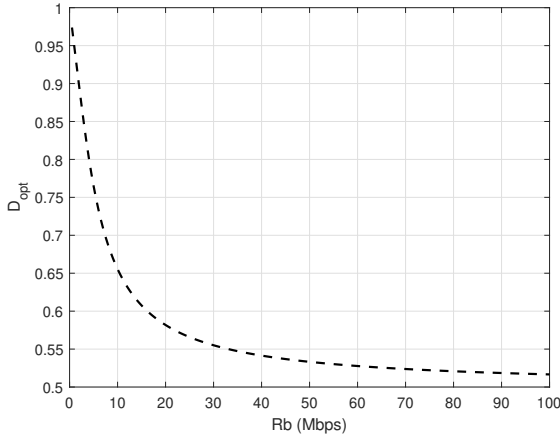


Figura 5. D ótimo teórico que anula a ISI do sinal, calculado pela Eq. 6.

3.2 Cálculo da Taxa de Erro de Bit

Uma das principais métricas de comunicação é a taxa de erro de bit. A partir dessa, com uma determina SNR e BW, atinge-se uma taxa de erros no sistema que depende de cada aplicação.

O diagrama de olho é uma ferramenta amplamente utilizada em links ópticos em telecomunicações, o qual permite, por exemplo, a obtenção do ponto ótimo de amostragem do sinal e sua respectiva qualidade. Considerando a probabilidade dos símbolos iguais e um canal com ruído branco gaussiano aditivo, a medição de qualidade de sinal, dada pela abertura do diagrama de olho de um sinal em função da SNR, é obtida através do Fator Q (Ohteru and Takachio, 1999), o qual considera a média dos níveis "1" e "0" e o respectivo desvio padrão do sinal. Conforme ilustrado na Figura 6, é possível observar que quanto maior for a diferença entre os níveis e menor o desvio padrão, maior será o valor do fator Q calculado.

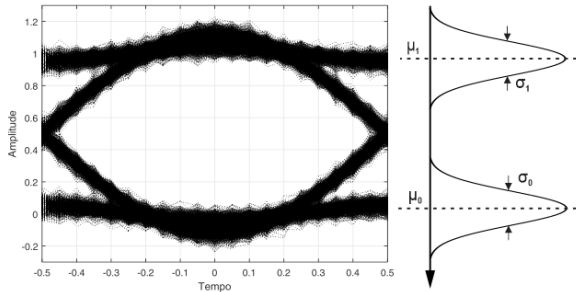


Figura 6. Relação entre abertura do olho e a função densidade de probabilidade de cada símbolo.

Quando a SNR do sinal é baixa, ou há muita ISI, o olho começa a fechar, visto que as médias são mais próximas e o desvio padrão torna-se relativamente maior e consequentemente aumenta a região de erros, onde haverá a sobreposição parcial das duas curvas. De acordo com as

normas da União Internacional de Telecomunicações (ITU) e literatura, o Fator Q do sinal pode ser calculado como:

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (7)$$

onde μ_1 e μ_0 representam as médias do nível lógico alto e baixo, e σ_1 e σ_0 são os desvios padrões do nível lógico alto e baixo, respectivamente.

O fator Q e a BER possuem uma relação direta de mapeamento. Ou seja, quanto mais nítida for a abertura do olho, maior o fator Q e menor é a BER do sistema. Essa relação é descrita abaixo:

$$BER(Q) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad (8)$$

Assim, através da ferramenta de diagrama de olho, é possível avaliar a BER de um sistema com transmissão em banda base, limitado por uma largura de banda BW.

4. RESULTADOS

4.1 Setup de Simulação

Os resultados foram obtidos através de simulação no software *MATLAB*, onde foi possível simular um sistema com resposta RC e variar a largura de banda de um sinal modulado através da excitação da corrente do LED, utilizando um valor fixo de SNR de 16 dB. Através da Figura 7 é possível visualizar cada parte do sistema, onde o transmissor é composto de um gerador aleatório de bits e da conformação dos pulsos de pré-ênfase utilizando PWM. Na recepção, o sinal é filtrado com um filtro de cosseno levantado, de forma que é possível obter os parâmetros do diagrama de olho para avaliação da BER.

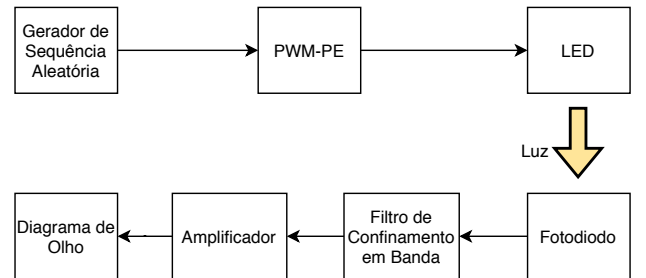


Figura 7. Diagrama de blocos do setup de simulação.

Além disso, conforme visualizado na Figura 8, exemplifica-se um sinal com R_b de 12 Mbps, que divide-se em com pré-ênfase e sem pré-ênfase, onde ambos serão filtrados pelo filtro com frequência de corte igual à R_b , confinando a banda necessária para transmissão em banda base e pelo filtro do canal.

O encurtamento do pulso utilizando pré-ênfase gera mais energia às componentes de alta frequência, e assim, equaliza o sinal, diminuindo a interferência inter-simbólica do sistema, visto que as transições de cada símbolo são mais rápidas. Outra métrica que possibilita ver o aumento de energia nas altas frequências, para uma mesma SNR, é o espectro de cada sinal. Na Figura 9, observa-se um sinal

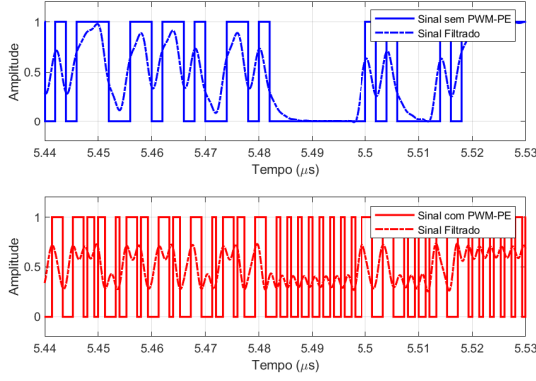


Figura 8. Sinal no tempo, com e sem pré-ênfase.

com BW de 1.5 MHz, possuindo largura de banda menor que a região de corte do LED, assim, a energia do sinal com e sem pré-ênfase é praticamente a mesma, entretanto, como esperado, a energia das altas frequências aparecem com mais ênfase.

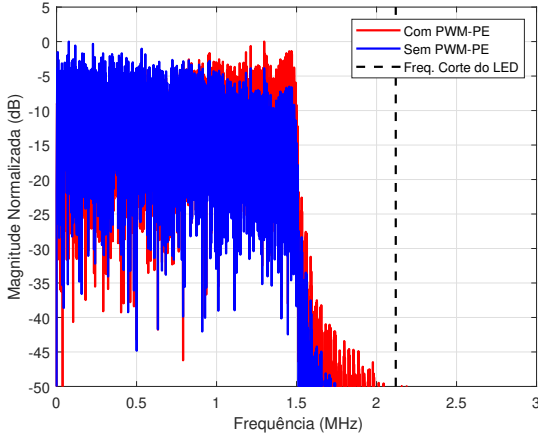


Figura 9. Espectro de frequências do sinal sem e com pré-ênfase, para uma BW de 1.5 MHz, com $D = 0.8$.

Porém, ao aumentar a largura de banda muito acima da frequência de corte do LED, observa-se um decaimento abrupto da energia de um sinal sem pré-ênfase, e a uma maior conservação da energia dentro da largura de banda para o sinal com pré-ênfase. Isso deve-se à escolha do D que irá formatar os pulsos e equalizar o sistema. Essa informação é evidenciada na Figura 10, em que é apresentado o espectro de frequências do sinal sem e com pré-ênfase, onde é possível observar um aumento de energia com a utilização da PWM-PE após o ponto de corte do dispositivo.

A conservação de maior energia do sinal utilizando a PWM-PE na largura de banda do mesmo possibilita melhorar a reconstrução no receptor, gerando um aumento no Fator Q do diagrama de olho, o qual reflete na qualidade do sinal transmitido, e consequentemente, gera diminuição dos erros.

4.2 Performance

Conforme explicado na Seção 3, uma das medições da qualidade do sinal transmitido que estão presentes na

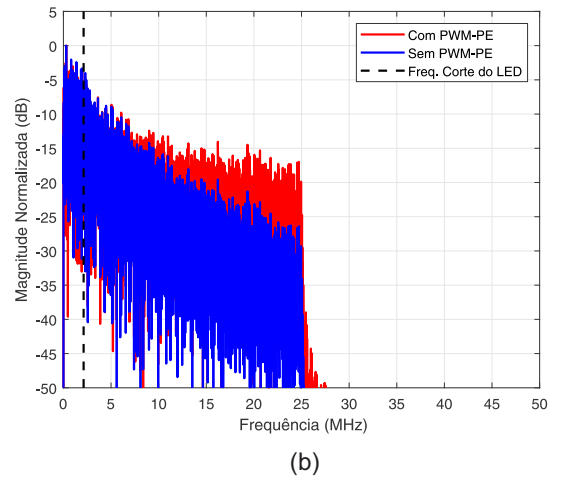
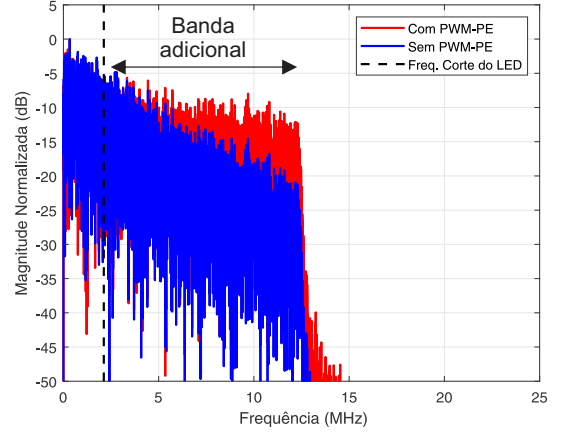


Figura 10. (a) Espectro de frequências do sinal sem e com pré-ênfase, para uma BW de 12.5 MHz, com $D = 0.6$; (b) Espectro de frequências do sinal sem e com pré-ênfase, para uma BW de 25 MHz, com $D = 0.55$.

literatura, é a do diagrama de olho. Através da Eq. 6, é possível calcular qual D_{opt} aproximado gera um pulso com ISI nula e assim, diminui a chance de erros no sistema para larguras de banda acima da frequência de corte do transmissor. Assim, a Figura 11 representa os valores simulados e analíticos utilizados na pré-ênfase, de forma que quanto maior a R_b do sinal, mais pré-ênfase é necessária para ocorrer uma abertura do olho.

Dessa forma, a partir das escolhas do D ótimo, é possível simular a pré-ênfase e avaliar o Fator Q e a BER através da Eq. 7 e 8. Primeiramente, para ilustração da abertura do olho, foram escolhidos 3 valores de R_b , calculando seu Fator Q e BER. Os resultados são mostrados na Tabela 1.

Além disso, observando o diagrama de olho do sinal com largura de banda abaixo de f_c , a abertura de olho ainda é pouco alterada com a pré-ênfase, conforme mostra a Figura 12, visto que ambos diagramas apresentam abertura do olho bastante significativa. Porém, quando aplicada a pré-ênfase, apesar da média dos níveis ser menor, o desvio padrão no ponto de abertura é menor, logo terá um aumento no Fator Q.

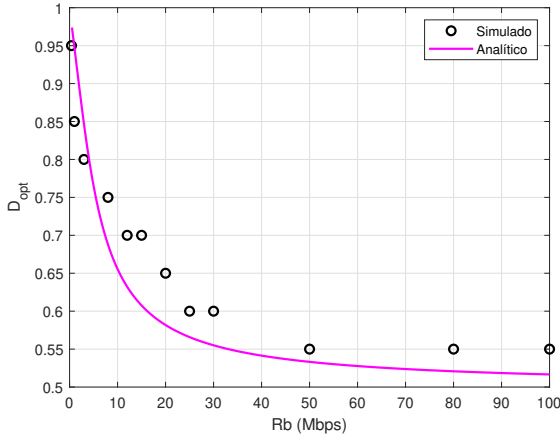


Figura 11. Valores teóricos e simulados do D ótimo que possibilitam a abertura do olho.

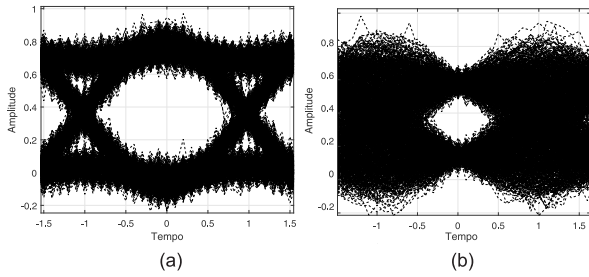


Figura 12. (a) Diagrama de olho sem pré-ênfase com R_b de 3 Mbps; (b) Diagrama de olho com pré-ênfase e D ótimo com R_b de 3 Mbps.

Entretanto, como já mencionado, ao aumentar a largura de banda do sinal muito acima da frequência de corte do LED, o olho começa a fechar, prejudicando diretamente no Fator Q do sinal. A Figura 13 evidencia esse aumento de BW, devido ao aumento da taxa de dados, e através da PWM-PE com a utilização do D ótimo para cada uma, é possível melhorar o sinal e abrir o olho, de maneira que a decodificação seja melhorada.

O objetivo desse trabalho foi dar ênfase nas altas frequências do espectro do sinal, de forma que aumente a largura de banda do mesmo e incremente a taxa de dados, mantendo uma BER significativamente melhor que a do sinal não equalizado. Em conclusão, conforme ilustra a Figura 14, é possível visualizar o aumento da taxa de dados, a qual terá também um aumento da largura de banda, e que para uma mesma BER, quanto maior a taxa, maior o ganho em

Tabela 1. Resultados da pré-ênfase, para 3 valores diferentes de R_b .

R_b	Resultado	Sem PWM-PE	Com PWM-PE
3 Mbps	Fator Q	5.95	6.05
	BER	1.34×10^{-9}	7.22×10^{-10}
	D	1	0.8
25 Mbps	Fator Q	2.35	4.92
	BER	9.25×10^{-3}	4.25×10^{-7}
	D	1	0.6
50 Mbps	Fator Q	1.54	3.80
	BER	6.21×10^{-2}	7.21×10^{-5}
	D	1	0.55

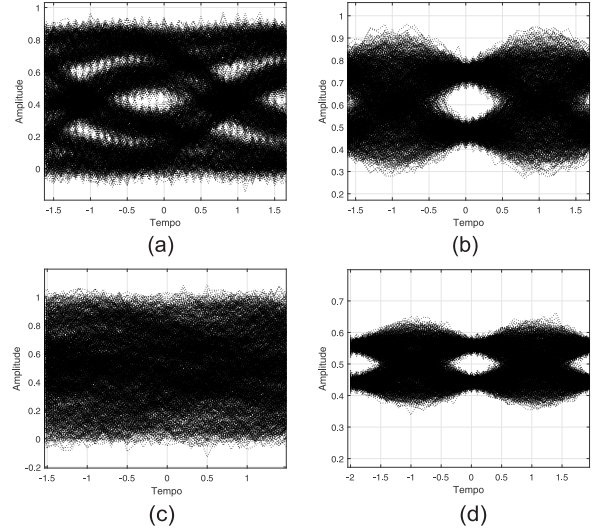


Figura 13. (a) Diagrama de olho sem pré-ênfase com R_b de 25 Mbps; (b) Diagrama de olho com pré-ênfase e D ótimo com R_b de 25 Mbps. (c) Diagrama de olho sem pré-ênfase com R_b de 50 Mbps; (d) Diagrama de olho com pré-ênfase e D ótimo com R_b de 50 Mbps.

velocidade de transmissão do sistema. Escolhendo um dos valores do gráfico como exemplo, para uma BER de 10^{-6} , a taxa de dados sem pré-ênfase é em torno de 12 Mbps, enquanto com o sinal de pré-ênfase obtém-se 36 Mbps. A simulação resulta em valores de taxas de dados de até 100 Mbps, porém com uma BER mais alta, o que pode comprometer a robustez do sistema.

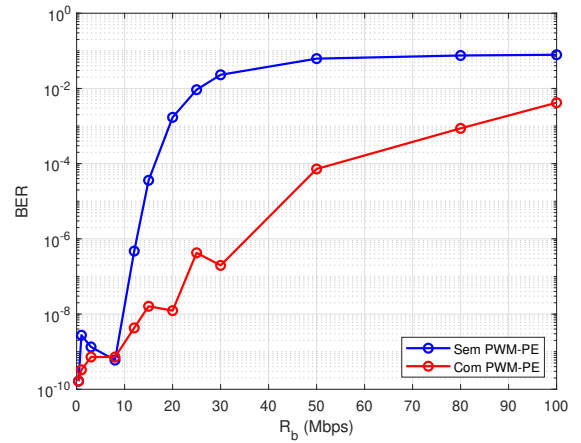


Figura 14. BER em função da taxa de dados do sistema.

5. CONCLUSÃO

Devido à limitação de resposta em frequência dos LEDs com cobertura de fósforo, os quais limitam-se entre 2 e 3 MHz, estudam-se formas de equalizar o sinal para alcançar altas taxas de dados.

Esse trabalho apresentou uma nova técnica de pré-ênfase aplicada a comunicação por luz visível, através da Modulação por Largura de Pulso. Através da escolha de um *duty cycle* ótimo, o qual varia entre 0.5 e 1, foi possível gerar uma abertura no diagrama de olho do sinal e alcançar

uma taxa de dados de 36 Mbps com uma taxa de erro menor que 10^{-6} para uma relação sinal-ruído fixa. Finalmente, diferente dos trabalhos encontrados na literatura, em que a grande maioria utiliza de variação da amplitude do sinal para altas frequências, esse trabalho utiliza do encurtamento do pulso, de forma que se possa diminuir a interferência inter-simbólica e aumentar consideravelmente a taxa de transmissão de dados do sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao GEDRE - Inteligência em Iluminação, a Universidade Federal de Santa Maria - UFSM e a CAPES (Programa PIBIC CNPq Nº 043402) pela estrutura e suporte durante os estudos.

REFERÊNCIAS

- Komine, T. and Nakagawa, M. (2004). Fundamental analysis for visible-light communication system using led lights. *IEEE transactions on Consumer Electronics*, 50(1), 100–107.
- Le Minh, H., O'Brien, D., Faulkner, G., Zeng, L., Lee, K., Jung, D., and Oh, Y. (2008). 80 mbit/s visible light communications using pre-equalized white led. In *2008 34th European Conference on Optical Communication*, 1–2. IEEE.
- Ohtheru, S. and Takachio, N. (1999). Optical signal quality monitor using direct q-factor measurement. *IEEE Photonics Technology Letters*, 11(10), 1307–1309.
- Pathak, P.H., Feng, X., Hu, P., and Mohapatra, P. (2015). Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges. *IEEE communications surveys & tutorials*, 17(4), 2047–2077.
- Schinkel, D., Mensink, E., Klumperink, E.A., van Tuijl, E., and Nauta, B. (2005). A 3-gb/s/ch transceiver for 10-mm uninterrupted rc-limited global on-chip interconnects. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 41(1), 297–306.
- Schrader, J.R., Klumperink, E.A., Visschers, J.L., and Nauta, B. (2006). Pulse-width modulation pre-emphasis applied in a wireline transmitter, achieving 33 db loss compensation at 5-gb/s in 0.13-/spl mu/m cmos. *IEEE journal of solid-state circuits*, 41(4), 990–999.
- Schratz, M., Gupta, C., Struhs, T., and Gray, K. (2016). A new way to see the light: Improving light quality with cost-effective led technology. *IEEE Industry Applications Magazine*, 22(4), 55–62.
- Schubert, E.F. (2006). Light-emitting diodes cambridge university press. *New York*, 35–40.
- Standard, I. (2011). Ieee standard 802 for local and metropolitan area networks—part 15.7: Short-range wireless optical communication using visible light.
- Teixeira, L., Loose, F., Alonso, J., Beltrame, R., Barriquello, C., Reguera, V.A., and Dalla Costa, M. (2019). Pre-emphasis control in switched mode power converter for energy efficient wide bandwidth visible light communication. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*.
- Zukauskas, A., Shur, M., and Gaska, R. (2002). Solid state lighting. *Introduction to Solid State Lighting*.