

Influência das Características de Filtros Sobre o Desempenho de Receptores Ópticos NRZ

Fábio Donati Simões e Amílcar Careli César

Resumo— Neste artigo é investigada a influência das características dos filtros de Bessel, Butterworth e Chebyshev sobre a taxa de erros de um sistema óptico de transmissão digital NRZ. As simulações são feitas a partir de software comercial e com base nas características de frequência de corte, ordem do filtro e relação sinal-ruído. Os resultados numéricos mostram que o desempenho de sistemas ópticos de transmissão pode ser melhorado com a escolha apropriada das características do filtro.

Palavras-chave— receptor óptico, pulso NRZ, filtros, taxa de erro.

Abstract— This paper analyses the influence of the characteristics of the Bessel, Butterworth and Chebyshev filters on the bit error rate (BER) of a digital-transmission optical system using NRZ code. The simulations are carried through commercial software and on the basis of the characteristics of cut-off frequencies, filter order and signal-to-noise ratio. The numerical results show that the performance of optical systems can be improved with the appropriate choice of the filter characteristics.

Keywords— optical receiver, NRZ pulse, filter, BER.

I. INTRODUÇÃO

A otimização de sistemas de transmissão digital com objetivo de melhorar o desempenho há muito tempo tem sido alvo de investigação e diversas técnicas de projeto de receptores otimizados foram propostas [1]. Muitas destas técnicas foram desenvolvidas para sistemas de transmissão puramente elétricos, como radiotransmissão. Por outro lado, em sistemas de transmissão óptica de longa distância, a principal fonte de ruído advém da amplificação óptica, podendo o sinal gerado no transmissor ser amplificado diversas vezes ao longo do trajeto. Cada vez que o sinal passa por um amplificador óptico há adição de certa quantidade de potência óptica de ruído ao sinal amplificado, dificultando a separação do sinal por meio de filtragem óptica convencional, justamente por estar no mesmo comprimento de onda.

Em sistemas comerciais de multiplexação por comprimento de onda (WDM— *wavelength division multiplexing*) os sinais ópticos provenientes do transmissor são separados na recepção e cada um deles é aplicado a um determinado

receptor óptico para a conversão do sinal óptico em elétrico e tratamento de sinal. O sinal óptico misturado ao ruído óptico é convertido no receptor em corrente elétrica por meio do fotodetector. É no fotodetector que se manifesta a principal característica que exige a extensão das técnicas convencionais de otimização de filtros para o caso de sistema de transmissão óptica. Como a transdução optoeletrônica é feita de maneira não-linear, de acordo com a abordagem semiclássica [2], a corrente de saída do fotodetector é proporcional ao quadrado da amplitude do campo elétrico e o efeito resultante é a existência de ruídos de amplitude dependente e independente da amplitude do sinal [3].

Em geral, simulações numéricas sobre sistemas de transmissão ópticos utilizam modelos de receptores com filtros de Bessel de 5^a. ordem [4]-[8] ou de 4^a. ordem [9]; filtros de Butterworth de 1^a. ordem [4], 2^a. ordem [10]-[15], 3^a. ordem [16], ou 5^a. ordem [5]; retangular [11], [17] e integradores perfeitos [17]-[19]. Nestas duas últimas categorias não são considerados os efeitos da fase na deformação dos sinais elétricos.

Diversos estudos têm sido realizados sobre o tema, mas falta ainda uma abordagem adequada que proporcione comparação direta entre os diversos tipos de filtragens e os efeitos sobre a qualidade do sinal na recepção.

Neste artigo, a influência das características do filtro elétrico do receptor sobre o desempenho de sistemas de transmissão óptica é analisada. São realizadas diversas comparações entre desempenho de receptores ópticos que utilizam filtros de Butterworth, Bessel e Chebyshev, de várias ordens e frequências de corte. Os resultados foram comparados em termos do fator Q, para dois valores de relação sinal-ruído óptica (OSNR— *optical signal-to-noise ratio*) do sinal aplicado ao receptor. O método utilizado para a análise foram simulações numéricas associadas à variação de parâmetros relacionados aos filtros elétricos, com efeitos sobre o diagrama de olho do sinal. As simulações são realizadas por meio de software comercial. Os resultados numéricos apresentados e discutidos atestam a necessidade da análise para otimizar o desempenho de receptores ópticos.

II. SISTEMA WDM E MODELO DE RECEPTOR

A Fig. 1 mostra um sistema de transmissão WDM típico.

Fábio Donati Simões, Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações— CPqD, Campinas, SP, fsimoes@cpqd.com.br.

Amílcar Careli César, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Depto. Eng. Elétrica, São Carlos, SP, amilcar@sel.eesc.usp.br.

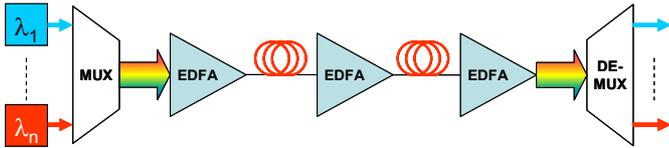


Fig. 1: Esquema genérico de sistema de transmissão WDM.

O módulo multiplexador acopla os sinais de diversos comprimentos de onda, provenientes dos transmissores ópticos (transponders), à entrada do amplificador a fibra dopada com érbio (EDFA), que amplifica o sinal e o lança na fibra. Após uma certa distância de propagação, o sinal é novamente amplificado e lançado na fibra óptica. Este processo pode se repetir diversas vezes para atender aos requisitos de desempenho. Quando alcança o receptor, o sinal é amplificado e os diversos comprimentos de onda são separados pelo demultiplexador. Cada saída do demultiplexador contém somente um canal (comprimento de onda) e estes são aplicados aos respectivos receptores ópticos.

A Fig. 2 mostra um esquema simplificado de configuração típica de receptor. Nela, o fotodetector é do tipo PIN e o primeiro estágio de amplificação é um amplificador de transimpedância (AMP), seguido de um circuito de decisão onde a tensão de saída do AMP é comparada a uma tensão de limiar (VL). Se a amplitude da tensão de saída do AMP+FPB for maior que VL, o bit é considerado 1 e, se for menor, é considerado 0.

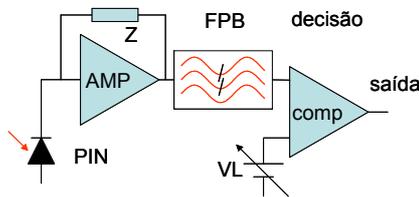


Fig. 2: Esquema genérico de receptor óptico.

III. TAXA DE ERRO

O modelo matemático utilizado para a determinação de taxas de erro considera que os bits 1 e 0 são equiprováveis e que a distribuição de probabilidade de cada nível tenha um perfil gaussiano, conforme ilustra a Fig. 3. A tensão de amostragem (VL) define a fronteira entre os níveis 0 e 1. No caso do modelo adotado, se a tensão de saída do AMP for superior a VL o bit é interpretado como 1 e abaixo como 0.

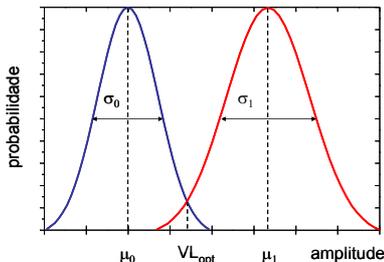


Fig. 3: Gráfico de distribuição de probabilidades em função da amplitude para os 0s e os 1s.

A taxa de erro, para uma determinada condição de relação

sinal-ruído, varia em função do valor do limiar de amostragem. Se o valor do limiar de amostragem for muito baixo, aumenta a probabilidade de um bit 0 ser considerado 1, aumentando a taxa de erro global. Se o limiar de decisão for muito alto, aumenta a probabilidade de um bit 1 ser considerado 0, também aumentando a taxa de erro global. Há um valor ótimo de limiar de decisão para o qual a probabilidade de considerar um bit 1 como 0 é igual à probabilidade de considerar um bit 0 como 1. Este limiar é chamado de limiar ótimo, VL_{opt} , e resulta na menor taxa de erro possível para esse sistema.

Considerando os parâmetros dados na Fig. 3, pode-se determinar a menor taxa de erros (BER) que o sistema pode apresentar. A BER é determinada a partir de

$$BER \cong \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right), \quad (1)$$

na qual

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (2)$$

e μ_0 e μ_1 são os valores médios dos níveis 0 e 1, respectivamente; σ_0 e σ_1 são os valores do desvio-padrão dos níveis 0 e 1, respectivamente. O valor do desvio-padrão corresponde ao valor RMS do ruído.

IV. CARACTERÍSTICAS DE FILTROS PASSA-BAIXAS

Neste trabalho foram utilizados três tipos básicos de filtros: Butterworth, Bessel e Chebyshev.

A função de transferência do filtro de Butterworth é dada por:

$$|S_{21}|^2 = \frac{1}{1 + (\omega/\omega_c)^{2n}}, \quad (3)$$

na qual ω é a frequência angular; ω_c a frequência de corte e n é a ordem do filtro.

A função de transferência do filtro de Chebyshev é dada por:

$$|S_{21}|^2 = \frac{1}{1 + [\varepsilon T_n(\omega/\omega_c)]^2}, \quad (4)$$

na qual ε é o fator de ondulação e $T_n(\omega)$ é o polinômio de Chebyshev de ordem n , dados por

$$T_0(\omega) = 1, \quad T_1(\omega) = \omega, \quad T_{n+1}(\omega) = 2\omega T_n(\omega) - T_{n-1}(\omega). \quad (5)$$

A função de transferência do filtro de Bessel é dada por:

$$|S_{21}|^2 = \frac{1}{\omega^{n+1} \left\{ \frac{\pi}{2\omega} [J_{-n-1/2}^2(\omega) + J_{n+1/2}^2(\omega)] \right\}}, \quad (6)$$

na qual J_k é a função de Bessel de primeira classe de ordem k .

Comparativamente, o filtro de Chebyshev exibe características mais acentuadas de seletividade e rejeição de faixa que o de Butterworth. Por outro lado, o filtro de Bessel exibe melhor característica de atraso de grupo que os de Butterworth e o de Chebyshev.

V. PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES

Para a análise do impacto das características dos filtros sobre a taxa de erros do sistema, os parâmetros de filtragem do receptor óptico (antes do circuito de decisão) foram variados. Os resultados foram obtidos utilizando o programa de simulação de sistemas ópticos OptiSystem [20]. Os parâmetros do sistema utilizados de simulação estão listados na Tabela 1. As faixas de varredura dos parâmetros dos filtros e relação sinal-ruído óptica são mostrados na Tabela 2.

TABELA 1. PARÂMETROS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES.

Parâmetro	Valor	Unidade	Condição/Obs.
Taxa	9,95328	Gbps	-
Comprimento da palavra	256	-	equiprováveis
Pontos por bit	64	-	-
Comprimento de onda	193,1	THz	-
No. de portadoras ópticas	1	-	-
Perfil do filtro óptico			Gaussiano
Ordem do filtro óptico (FO)	1	-	-
Largura de faixa do FO	50	GHz	3 dB do pico
Razão de extinção do modulador	13	dB	-
Tempo de subida do bit	0,25 × tempo de bit	-	-
Tempo de descida do bit	0,25 × tempo de bit	-	-

TABELA 2. VARREDURA DE PARÂMETROS PARA AS SIMULAÇÕES.

Parâmetro	Início	Fim	Unidade	Incremento
Freq. de corte	0,3	50	GHz	50 MHz
Ordem do filtro	1	10		1
OSNR (0,2 nm)	15	20	dB	5 dB

Os valores de relação sinal-ruído óptica usados nas simulações referem-se à banda de integração de ruído de 0,2 nm.

VI. RESULTADOS NUMÉRICOS

As simulações foram feitas sem considerar eventuais distorções de sinal durante a propagação. O sinal aplicado ao fotodetector foi mantido em 0 dBm e a potência de emissão espontânea foi aplicada em 2 níveis. A frequência de corte de cada filtro passa-baixas simulado foi variada e o valor do fator Q calculado pelo simulador para cada caso por meio de (2).

Os filtros testados foram: Butterworth, Chebyshev e Bessel. O filtro de Chebyshev tem uma amplitude de modulação (*ripple*) de 0,5 dB.

Os resultados das simulações realizadas são apresentados nas Figs. 4 a 9. Os gráficos mostram a variação do fator Q resultante com a frequência de corte (F_c) do filtro, normalizada em relação à taxa de transmissão (BR— *bit rate*). O fator Q é utilizado para calcular a BER, por meio de (1). Por exemplo, $Q=6$ fornece $BER \approx 10^{-9}$, enquanto $Q=7$, $BER \approx 10^{-12}$, valores freqüentemente utilizados. Os valores máximos do fator Q fornecem os valores mínimos de BER. São utilizados dois valores de OSNR, 20 e 15 dB.

Observa-se que, de maneira geral, todas as configurações apresentam um valor ótimo para a frequência de corte. Abaixo deste valor a deformação causada pelo filtro tende a provocar o fechamento do diagrama de olho, penalizando a

sensibilidade do receptor. Acima do valor ótimo de frequência de corte, a deformação do sinal recebido não é significativa, porém a quantidade de ruído no circuito de decisão aumenta, piorando a sensibilidade do receptor.

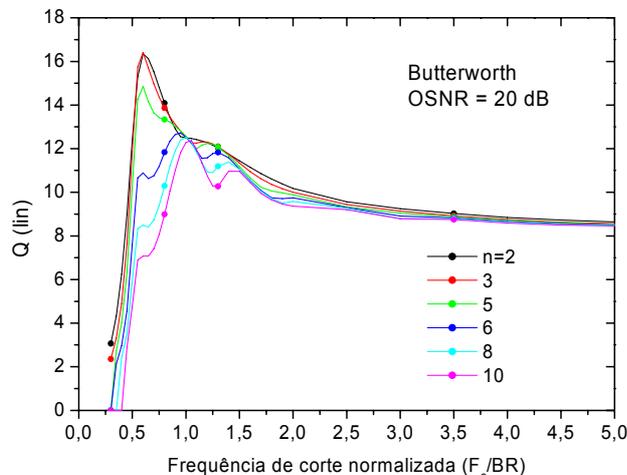


Fig. 4: Fator Q versus frequência normalizada de corte para filtro de Butterworth com OSNR = 20 dB.

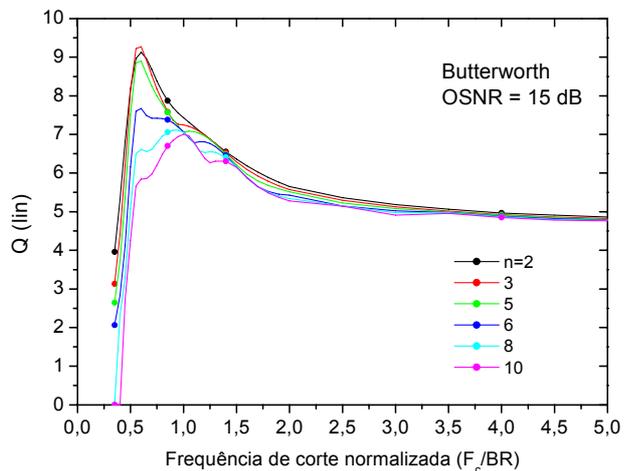


Fig. 5: Fator Q versus frequência normalizada de corte para filtro de Butterworth com OSNR = 15 dB.

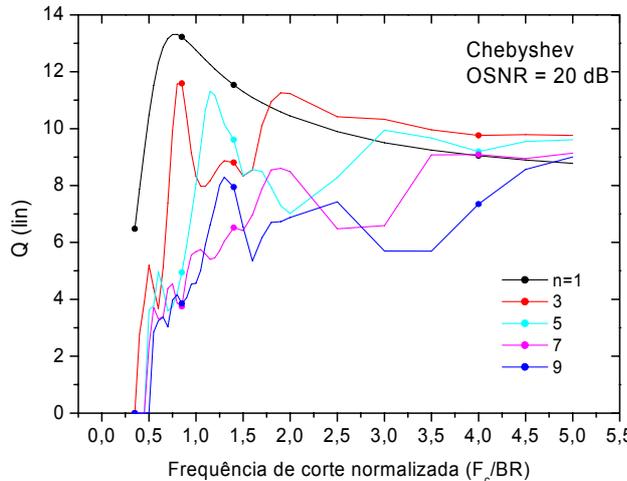


Fig. 6: Fator Q versus frequência normalizada de corte para filtro de Chebyshev com OSNR = 20 dB.

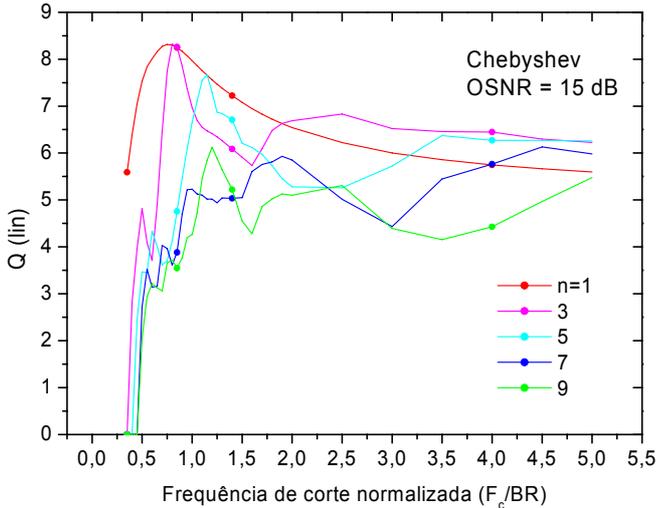


Fig. 7: Fator Q versus frequência normalizada de corte para filtro de Chebyshev com OSNR = 15dB.

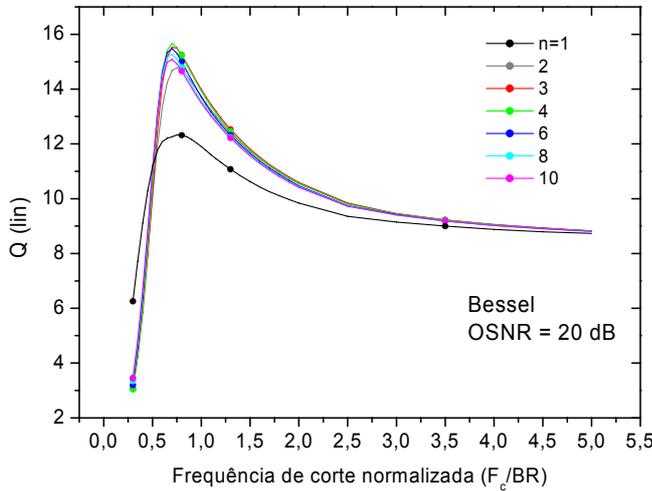


Fig. 8: Fator Q versus frequência normalizada de corte para filtro de Bessel com OSNR = 20dB.

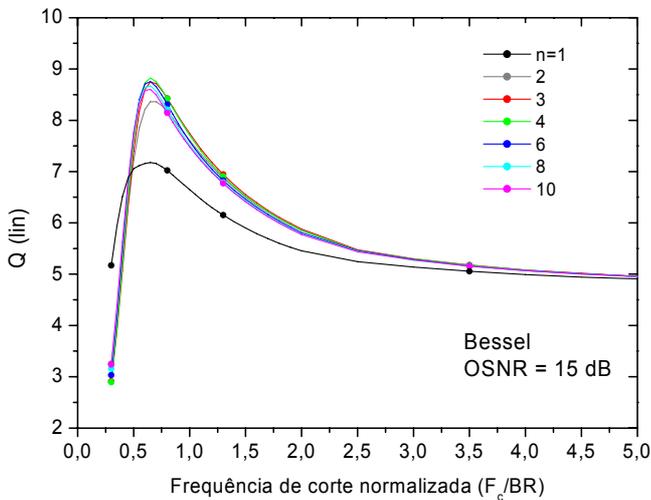


Fig. 9: Fator Q versus frequência normalizada de corte para filtro de Bessel com OSNR = 15dB.

A Tabela 3 mostra os melhores resultados obtidos com cada um dos filtros testados e compara os resultados com os demais filtros em condições iguais.

TABELA 3: COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DOS MELHORES RESULTADOS.

Filtro	OSNR = 20 dB			OSNR = 15 dB		
	Ordem	Q	Fc/BR	Ordem	Q	Fc/BR
Bessel	4	15,66	0,70	4	8,82	0,65
Butterworth	3	16,41	0,60	3	9,27	0,60
Chebyshev	1	13,32	0,80	1	8,32	0,75

Na comparação dos melhores resultados, o filtro de Butterworth se destaca com pequena vantagem (0,8 e 0,4 dB, aproximadamente) em relação ao desempenho do filtro de Bessel.

As Figs. 10 e 11 mostram curvas comparativas entre os três tipos de filtros para OSNR de 20 dB. Nelas são mostrados os valores de fator Q para os filtros em função da frequência de corte. A Fig. 10 mostra filtros de 1ª. ordem e a Fig. 11 mostra o comportamento de filtros de 3ª. ordem.

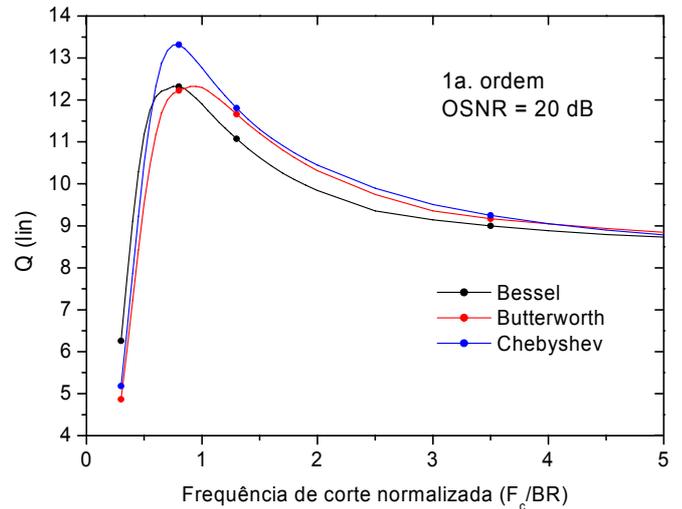


Fig. 10 Q versus frequência de corte normalizada para filtros de 1a. ordem OSNR=20dB.

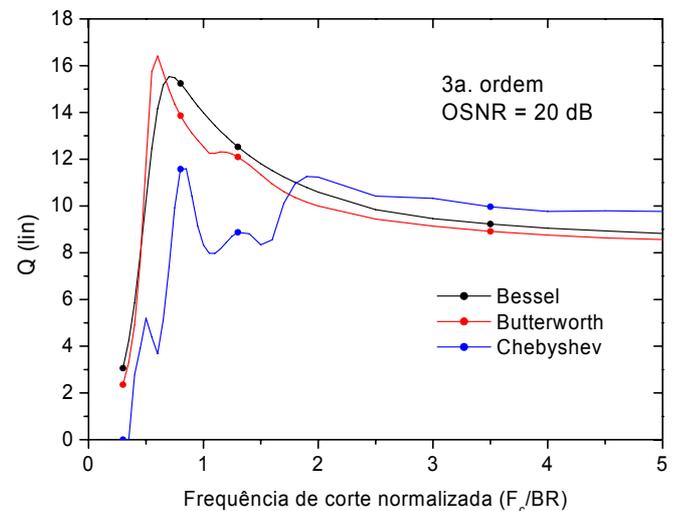


Fig. 11: Q versus frequência de corte normalizada para filtros de 3a. ordem OSNR=20dB.

A seguir, as frequências de corte de cada configuração foram ajustadas para se obter o maior valor de Q do receptor, para se obter o maior valor de Q do receptor, com intuito de comparar o desempenho de cada tipo de filtro, em função de sua ordem. Os resultados para OSNR de 15 e 20 dB estão mostrados nas Figs 12 e 13, respectivamente.

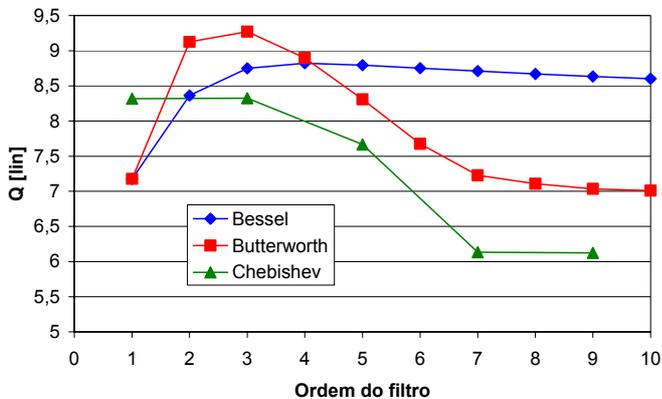


Fig. 12: Comparativo de melhores resultados para cada tipo de filtro em função da ordem. OSNR=15 dB

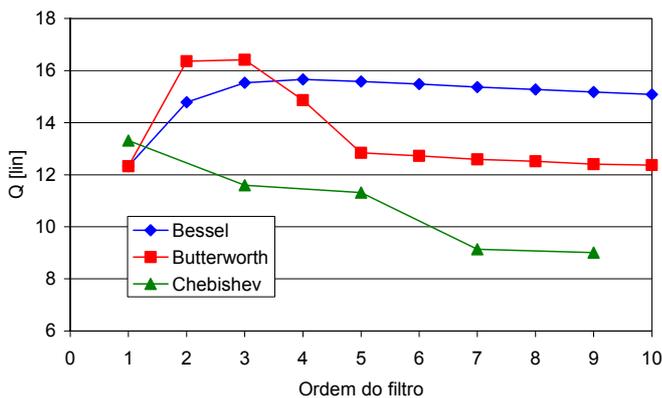


Fig. 13: Comparativo de melhores resultados para cada tipo de filtro em função da ordem. OSNR=20 dB.

Por meio das Figs. 12 e 13 é possível observar que o filtro de Butterworth apresenta melhor compromisso entre a deformação do sinal e a redução de ruído, resultando em um desempenho superior do receptor em termos de sensibilidade.

As Figs. 14 a 16 mostram o diagrama de olho na saída dos três tipos de filtro, para a melhor configuração de cada um em termos de frequência de corte e ordem. Para uma melhor visualização, o ruído dos respectivos sinais foi retirado dos diagramas.

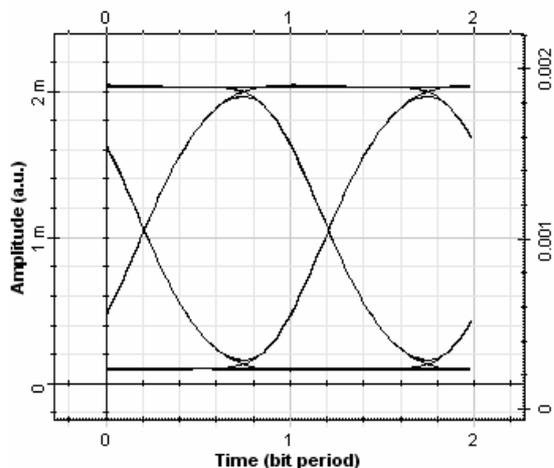


Fig. 14: Diagrama de olho para o filtro de Bessel.

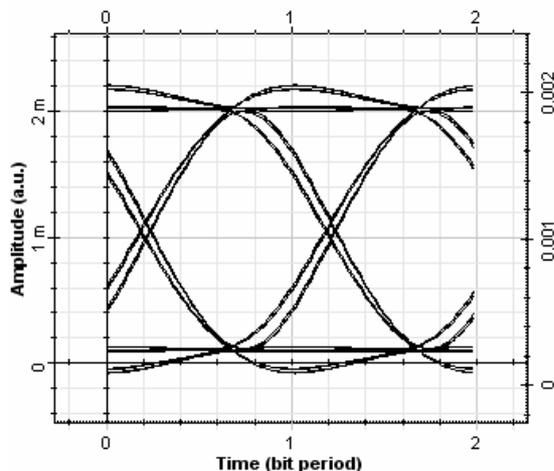


Fig. 15: Diagrama de olho para o filtro de Butterworth.

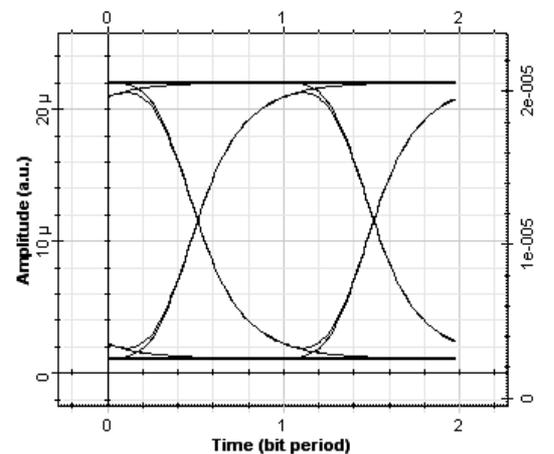


Fig. 16: Diagrama de olho para o filtro de Chebyshev.

VII. CONCLUSÕES

A influência sobre o desempenho de sistemas de transmissão óptica das características dos filtros de Butterworth, Bessel e Chebyshev é analisada neste artigo.

As simulações foram feitas a partir de software comercial e com base nas características de frequência de corte, ordem do filtro e relação sinal-ruído.

No caso do conjunto de parâmetros utilizado para as simulações, o filtro de Butterworth apresentou melhor

equilíbrio entre a rejeição de ruído e a deformação do sinal de saída, em relação ao filtro de Bessel, ambos em condições ótimas.

O estudo demonstra que em condições específicas de transmissão, análise meticulosa deve ser feita para escolher o tipo mais adequado de filtro e garantir melhor desempenho do receptor óptico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações—CPqD e ao Projeto Giga-CPqD-FINEP-FUNTEL, CPqD e contrato FIPAI-CPqD no. 1360, o suporte a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] H. J. Blichikoff, Filtering in the time and frequency domains, *John Wiley & Sons*, 1976.
- [2] E. Desurvire, Erbium-Doped Fiber Amplifiers Principles and Applications, *John Wiley & Sons*, 1994.
- [3] F. D. Simões, “Estudo da influência de amplificadores à fibra dopada com érbio em sistema de comunicações óptica digitais”, dissertação de mestrado, EESC-USP, 1995.
- [4] P.J. Winzer, M. Pfennigbauer, M.M. Strasser e W.R. Leeb, “Optimum filter bandwidths for optically preamplified NRZ receivers”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 19, no. 9, pp. 1263-1273, setembro de 2001. Correção em *JLT*, vol. 19, no. 11, p. 1794, novembro de 2001.
- [5] I. Lyubomirsky, S. Shetty, J. Roman e M.Y. Frankel, “Optimum 10-Gb/s NRZ receiver bandwidths for ultradense WDM transmission systems”. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14, no. 6, junho de 2002.
- [6] He Yongqi, Li Zhuang, B.F. Jorgensen, R.J. Pedersen, “An accurate model of optically preamplified receivers for arbitrary optical bandpass filter and arbitrary post-detection filter”, *Communication Technology Proceedings, International Conference on Communication Technology-ICCT'98*, 22-24 outubro de 1998.
- [7] M. Pfennigbauer, M.M. Strasser, M. Pauer e P.J. Winzer, “Dependence of optically preamplified receiver sensitivity on optical and electrical filter bandwidths-measurement and simulation”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14, no. 6, junho de 2002.
- [8] P.J. Winzer e R.J. Essiambre, “Optical receiver design trade-offs”, *Optical Fiber Communications Conference- OFC'03*, 23-28 março de 2003.
- [9] A. Carlsson, G. Jacobsen e A. Berntson, “Receiver model including square-law detection and ISI from arbitrary electrical filtering”, *Optical Fiber Communications Conference, 2003. OFC 2003*, 23-28 de março de 2003.
- [10] J.L. Rebola e A.V.T. Cartaxo, “Power penalty assessment in optically preamplified receivers with arbitrary optical filtering and signal-dependent noise dominance”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, no. 3, março de 2002.
- [11] J.L. Rebola e A.V.T. Cartaxo, “Gaussian approach for performance evaluation of optically preamplified receivers with arbitrary optical and electrical filters”, *IEE Proceedings on Optoelectronics*, vol. 148, no. 3, junho de 2001.
- [12] J.L. Rebola e A.V.T. Cartaxo, “New Gaussian approximation for performance assessment of optically preamplified receivers with arbitrary optical and electrical filters”, *The 4th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2001. CLEO/Pacific Rim 2001, vol. 2, 15-19 de julho de 2001.
- [13] E.W. Laedke, N. Goder, T. Schaefer, K.H. Spatschek e S. Turitsyn, “Improvement of optical fibre systems performance by optimisation of receiver filter bandwidth and use of numerical methods to evaluate Q-factor”, *Electronics Letters*, vol. 35, no. 24, 25 novembro de 1999.
- [14] J.L. Rebola, J.L. e A.V.T. Cartaxo, “Q-factor estimation and impact of spontaneous-spontaneous beat noise on the performance of optically preamplified systems with arbitrary optical filtering” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, no. 1, janeiro de 2003.
- [15] J.L. Rebola e A.V.T. Cartaxo, “Gaussian approach for performance evaluation of optically preamplified receiver with arbitrary optical and electrical filters”, *IEE Proc. on Optoelectronics*, vol. 148, no. 3, junho de 2001.
- [16] S.L. Danielsen *et al.*, “Detailed noise statistics for an optically preamplified direct detection receiver”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, no. 5, maio de 1995.
- [17] D.M. Shamoon, J.M.H. Elmirghani e R.A. Cryan, “Characterisation of optically preamplified receivers with fibre Bragg grating optical filters”, *IEE Colloquium on Optical Fibre Gratings* (Ref. No. 1999/023), 26 de março de 1999.
- [18] L.F.B. Ribeiro, J.R.F. da Rocha e O.L. Pinto, “Performance evaluation of EDFA preamplified receivers taking into account intersymbol interference”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, no. 2, fevereiro de 1995.
- [19] A. Carlsson, G. Jacobsen e A. Berntson, “Rigorous modeling of noise and ISI in optical WDM receivers with arbitrary electrical filtering”, *Lasers and Electro-Optics-CLEO '02*. 19-24 de maio de 2002.
- [20] Optiwave Systems Inc. Acessível em www.optiwave.com.