

Entrelaçamento em Frequência para 50 Gb/s e 100 Gb/s DWDM-PON

Diogo Coelho, Pablo Marciano, Thiago Coelho, Marcelo Segatto e Maria J. Pontes

Resumo — Este trabalho estende a análise do conceito de frequências entrelaçadas para uma rede óptica passiva (PON), utilizando multiplexação por divisão de comprimento de onda densa (DWDM). Um gerador óptico de pentes de frequências é usado para criar o padrão de entrelaçamento desejado. Para o sistema simulado utilizando modulação NRZ-OOK (*Not Return to Zero – On-Off Keying*), obteve-se taxa de transmissão de 50 Gbit/s (4×25 Gbit/s), enquanto que considerando-se DQPSK (*Differential Quadrature Phase Shift Keying*), chegou-se a 100 Gbit/s (4×25 Gbit/s). As simulações foram realizadas em *Matlab* para 20 km e 40 km de fibra monomodo em *downstream*.

Palavras-Chave — DWDM, PON, eficiência espectral, entrelaçamento em frequência

Abstract — In this work, we present the results of frequency interleaving applied to passive optical networks (PON) based in Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM). An optical comb source is used to create the interleaved wavelengths pattern. The system with 4×12.5 Gbit/s NRZ-OOK (*Not Return to Zero – On-Off Keying*) and 4×25 Gbit/s DQPSK (*Differential Quadrature Phase Shift Keying*) were simulated through 20 km and 40 km of single mode fiber in downstream path. All simulations were performed in *Matlab* environment.

Keywords — DWDM, PON, spectral-efficiency, frequency interleaving.

I. INTRODUÇÃO

O fato de não existir componentes ativos conectando o terminal de linha óptica (OLT - *Optical Line Terminal*) às diversas unidades de rede ópticas (ONU - *Optical Network Units*) está entre as vantagens em se utilizar redes PON. Além disso, a elevada largura de banda combinada com a infraestrutura disponível, que pode ser compartilhada pelos diversos usuários da rede, reduz os custos e simplifica a manutenção e operação [1]. Por outro lado, sistemas WDM-PON têm sido estudados como uma maneira de solucionar a crescente demanda por serviços com elevadas taxas de dados.

A técnica WDM considera o padrão ITU-T de alocação e espaçamento (50 GHz e 100 GHz) para comprimentos de onda, reservando uma região do espectro para transmissão *downstream* e outra para *upstream*. Esta estratégia de alocação de comprimentos de onda resulta em uma utilização ineficiente do espectro disponível. Além disso, as operadoras exigem que os novos padrões de redes PON devam coexistir com os anteriores, pois isso facilitaria a migração progressiva dos assinantes aos novos serviços de acordo com a demanda. Como seria de se esperar, a cada geração de PON, a disponibilidade de espectro não alocado tende a diminuir [2-4].

Para melhorar a eficiência espectral, e com isso garantir coexistência com padrões de redes PON anteriores, introduzimos em [5] o conceito de entrelaçamento de

frequências, como uma solução para o planejamento e alocação de comprimentos de onda para futura geração de redes de acesso ópticas.

Em [5], uma fonte de pentes de comprimentos de onda centralizada é responsável pela geração de comprimentos de onda igualmente espaçados e travados em frequência. Cada comprimento de onda é modulado com uma taxa de símbolo igual ao espaçamento em frequências gerada na fonte. Os comprimentos de onda ímpares foram usados na transmissão *downstream*, enquanto que os pares foram usados na transmissão *upstream*, criando um padrão de entrelaçamento entre comprimentos de onda consecutivos. Além disso, cada grupo dinâmico de 64 ONUs compartilha, no tempo, um dos quatro comprimentos de onda de *downstream* ou *upstream*. Isto significa que o elemento divisor/combinador da rede PON compartilha sinal para 256 ONUs.

Neste trabalho, apresentamos novos resultados para redes de acesso DWDM-PON utilizando entrelaçamento de frequências, onde os comprimentos de onda de *downstream* e *upstream* encontram-se próximos (espaçamento de 12,5 GHz), compartilhando assim a mesma região do espectro de transmissão óptico, aumentando assim a eficiência de aproveitamento do espectro, como já mencionado anteriormente. As simulações, desenvolvidas em *Matlab*, foram realizadas com $4 \times 12,5$ Gbit/s NRZ-OOK e 4×25 Gbit/s DQPSK, em 20 km e 40 km de fibra monomodo padrão (SSMF - *standard single mode fiber*) na transmissão *downstream*. A metodologia usada foi similar a criada pelos autores em [6], na qual os vários dispositivos ópticos da rede foram modelados para simulação de planejamento de redes *backbone*.

Na seção II apresenta-se o princípio de operação do gerador de pentes de comprimentos de onda usados nesse trabalho. Seção III apresenta a estratégia de uso de frequências entrelaçadas. Seção IV descreve-se como foram realizadas as simulações e são apresentados os resultados obtidos. Por fim, na Seção V as conclusões são apresentadas.

II. RECIRCULAÇÃO COM DESLOCAMENTO DE FREQUÊNCIAS

A técnica de recirculação com deslocamento de frequências (RFS - *Recirculating Frequency Shifting*), como ilustrado em Fig. 1, é um método para gerar um pente de comprimentos de onda travados em frequência. Tem como vantagens a excelente estabilidade, baixa variação de potência entre os comprimentos de onda, flexibilidade e baixa tensão no sinal elétrico de controle do espaçamento, sendo assim adequado para comunicações ópticas e aplicações fotônicas em rádio frequências [7-8].

A fim de produzir o pente de comprimentos de onda travados em frequência, um laser em modo contínuo é usado como alimentação óptica e determina a posição inicial de geração dos múltiplos comprimentos de onda que serão utilizados. O

Diogo Coelho, Universidade Federal de Juiz de Fora, rua José Lourenço Kelmer s/n, São Pedro, JF, MG, e-mail: diogo.coelho@ufjf.edu.br; Maria J. Pontes, Universidade Federal do Espírito Santo, Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória, ES, e-mail: mjpontes@ele.ufes.br.

amplificador óptico (AO) usado no anel óptico de recirculação, como mostra a Fig. 1, compensa as perdas de inserção dos diversos dispositivos utilizados, como moduladores e filtros, bem como a perda do acoplador. Um filtro óptico (FO) define a faixa de comprimento de onda de geração dos múltiplos canais ópticos.

O sinal óptico ao passar pelo modulador complexo de *Mach-Zehnder* (IQ-MZM), que está ajustado para gerar um sinal banda lateral única com portadora suprimida, irá deslocar a frequência do sinal óptico em um passo igual a frequência (f_c) do sinal elétrico senoidal de controle aplicado no IQ-MZM. Após uma volta completa, o comprimento de onda do sinal óptico contínuo irá ocupar a posição anteriormente suprimida. Como resultado, novos comprimentos de onda serão gerados a cada volta do sinal óptico.

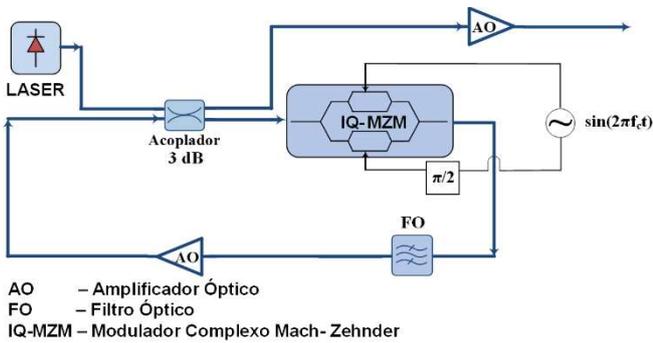


Fig. 1. Gerador de pente de frequências usando técnica RFS.

III. ESTRATÉGIA DE UTILIZAÇÃO DE FREQUÊNCIAS ENTRELACADAS

O esquema da arquitetura da OLT utilizando o conceito de entrelaçamento de frequências para redes DWDM-PON, está representado na Fig. 2. Um gerador RFS, conforme descrito na Seção II, é responsável pela criação dos comprimentos de onda de *downstream* e *upstream* espaçados por f_c em Hz. O dispositivo de demultiplexação, que corresponde a um conjunto de interferômetros de *Mach-Zehnder* (MZI) em cascata, conforme definido e modelado em [4], separa os múltiplos comprimentos de onda gerados. Os comprimentos de onda ímpares são modulados, usando moduladores de *Mach-Zehnder* (MZM), enquanto os comprimentos de onda pares permanecem sem qualquer processo de modulação. Após isso, um combinador óptico (acoplador) é responsável por multiplexar os comprimentos de onda pares e ímpares, criando um padrão de entrelaçamento.

A arquitetura da ONU encontra-se representada na Fig. 3. O dispositivo de demultiplexação mostrado na arquitetura da OLT, também participa do processo de separação dos diversos comprimentos de onda na ONU. Após a separação dos comprimentos de onda de *downstream* e *upstream*, cada comprimento de onda de *downstream* passará por um processo de detecção direta (DD) óptica, enquanto os outros serão enviados para o processamento de *upstream*.

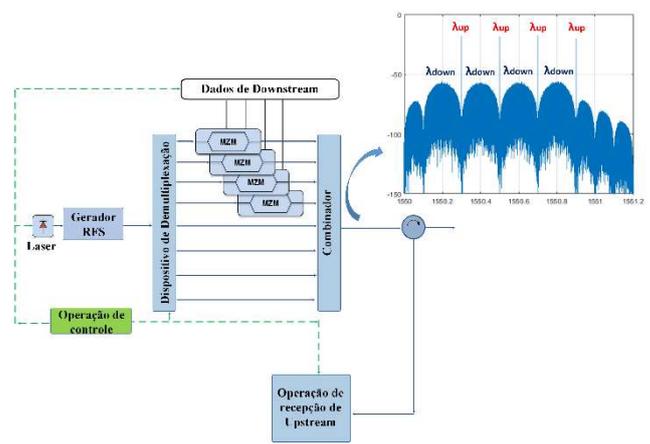


Fig. 2. Ilustração da arquitetura da OLT.

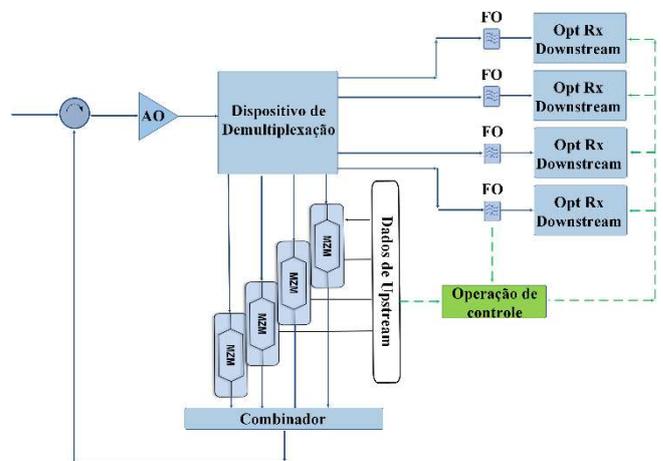


Fig. 3. Ilustração da arquitetura da ONU.

IV. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

O Sistema DWDM-PON proposto foi simulado em *Matlab*, para o percurso de *downstream*. Um modelo de SSMF foi desenvolvido com fator de atenuação $\alpha = 0,2$ dB/km, coeficiente de dispersão $D = 17$ ps/nm.km e declive de dispersão $S = 0,09$ ps/nm².km² no comprimento de onda de referência de 1550 nm. O ruído térmico foi inserido no modelo de fotodetector.

No gerador RFS, o laser em modo contínuo emite um sinal óptico em 1550,2 nm e com uma pequena largura de linha (> 1 KHz), para garantir um baixo ruído de fase nos múltiplos comprimentos de onda gerados [9]. O amplificador óptico dentro do anel corresponde a um amplificador dopado com érbio (EDFA) com 5,6 dB de ganho, garantindo assim uma compensação das perdas geradas pelo modulador e pelo acoplador óptico. O sinal de RF de controle do gerador RFS é um sinal senoidal de frequência (f_c) 12,5 GHz, gerando assim comprimentos de onda com 0,1 nm de espaçamento e 0,87 dB de variação de potência. O filtro óptico (OF) em 0,7 nm de largura de banda ($\approx 87,5$ GHz), que resulta em 8 comprimentos de onda (1550,2 nm até 1550,9 nm).

Os comprimentos de onda gerados foram separados usando o dispositivo de demultiplexação, em 4 comprimentos de onda ímpares para o *downstream* e 4 pares de *upstream*, ou seja, apresentaram-se entrelaçados ocupando a mesma região do espectro. A relação sinal-ruído óptica (OSNR) de 30 dB foi usada para todos os comprimentos de onda. Os comprimentos de onda ímpares foram modulados em diferentes formatos de modulação óptica (OOK ou DQPSK) e combinados com os pares (não modulados) por um combinador (acoplador óptico). O atraso temporal gerado pela propagação na fibra foi compensada pelo uso de uma sequência de treinamento, antes da transmissão de dados. A Tabela I resume os valores dos principais parâmetros usados nas simulações em *Matlab*.

TABELA I. Parâmetros usados nas simulações.

Parâmetros	
Taxa de Bits	50 Gbits/s e 100 Gbits/s
Formatos de Modulação	NRZ-OOK e DQPSK
Quantidade de Canais	4 (<i>downstream</i>) 4 (<i>upstream</i>)
OSNR dos canais	30 dB
Nº de bits por canal	$2^{19} - 1$
Espaçamento entre canais	0,1 nm (12,5 GHz)
Máxima variação de potência entre canais	0,87 dB
Comprimento de Onda de referência	1550 nm
Comprimento de fibra	20 km e 40 km
Atenuação da fibra	0,2 dB/km
Dispersão da fibra	17 ps/nm.km
Declive de Dispersão	0,09 ps/nm ² .km ²

No sistema 4 x 12,5 Gbits/s NRZ-OOK, sequências de bits pseudoaleatórias com tamanho de $2^{19} - 1$ por comprimento de onda foram geradas. As curvas de taxa de erro de bit (BER – *bit error rate*) foram geradas para as máximas distância de 20 km e 40 km de SSMF, para transmissão *downstream*, sem uso de técnicas de compensação de dispersão, e podem ser observadas na Fig. 4. Um limiar aceitável de códigos corretores de erro (FEC – *forward error correction*) de $3,8 \times 10^{-3}$ foi inserido, para avaliação de desempenho. Para cada nível de potência, a simulação foi efetuada quatro vezes e uma média dos valores de BER obtidos foi realizada. O mesmo procedimento foi realizado para o sistema 4 x 25 Gbits/s considerando a modulação DQPSK e seus resultados podem ser observados na Fig. 5.

Como observado na Fig. 4, o desempenho do sistema NRZ-OOK permanece abaixo do limiar de FEC, conforme desejado, para potências ópticas recebidas maiores que -23,5 dBm após 20 km de propagação na fibra e maiores que -23 dBm após 40 km. Concluímos que o sistema é somente limitado pelo ruído co-canal de amplitude gerado pelo processo DWDM.

Na Fig. 5, o sistema DQPSK permanece abaixo do limiar de FEC para potências ópticas recebidas maiores que -13 dBm após 20 km de propagação na fibra e maiores que -11,5 dBm após 40 km. Concluímos pelos resultados que o sistema é muito limitado pelo ruído de fase gerado pela interferência co-canal. Um meio

de evitar este efeito é o uso do dispositivo de MZIs em cascata operando como um multiplexador na OLT. Isto atenuaria em 20 dB o ruído co-canal na banda de transmissão, conforme se constatou em [10].

Analisando as Fig. 4 e Fig. 5, os piores valores de BER ocorreram nos comprimentos de onda λ_3 e λ_5 . Isso pode ser atribuído ao fato destes canais de comprimento de onda estarem posicionados justamente no meio do espectro de transmissão e por isso são os que mais sofrem efeitos do ruído co-canal. O mesmo efeito já tinha sido observado em [11], onde o desempenho do sistema 4 x 12,5 Gbits/s NRZ-OOK foi analisado em termos de diagrama de olho.

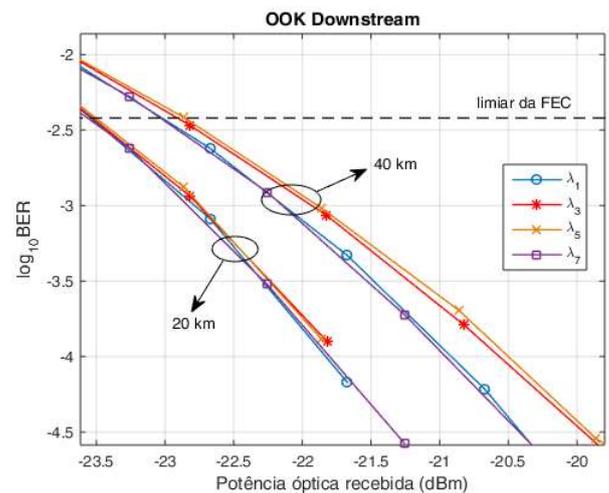


Fig. 4. Taxa de erro de bit em função da potência óptica recebida para o sistema utilizando modulação NRZ-OOK.

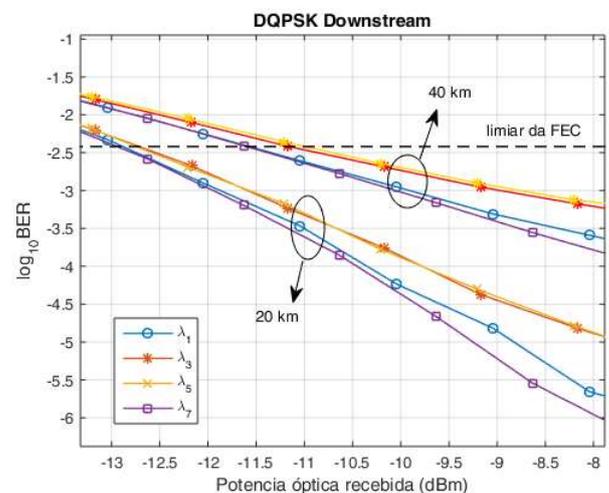


Fig. 5. Taxa de erro de bit em função da potência óptica recebida para o sistema utilizando modulação DQPSK.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi discutido o conceito de frequências entrelaçadas para uma rede óptica passiva (PON), utilizando multiplexação por divisão de comprimentos de onda densa (DWDM), estendendo a análise de trabalhos anteriores para novos formatos de modulação.

Para o sistema NRZ-OOK usamos uma taxa de transmissão de 50 Gbits/s e o seu desempenho permanece abaixo do limiar

de FEC, para potências ópticas recebidas maiores que -23,5 dBm após 20 km de propagação na fibra e maiores que -23 dBm após 40 km.

No caso do sistema utilizando modulação DQPSK, utilizou-se uma taxa de transmissão de 100 Gbits/s e o seu desempenho permanece abaixo do limiar de FEC, para potências ópticas recebidas maiores que -13 dBm após 20 km de propagação na fibra e maiores que -11,5 dBm após 40 km. Embora o sistema com modulação DQPSK tenha limitações, este permite taxa de transmissão muito superior ao NRZ-OOK.

Para ambos os formatos de modulação, a rede é limitada pelo ruído co-canal entre os múltiplos comprimentos de onda gerados. Isto ocorre, devido ao processo de multiplexação ser realizado somente com um acoplador. Pode-se minimizar este efeito com o uso do dispositivo de demultiplexação como um multiplexador na OLT. Além disso, o processo de demultiplexação insere uma perda de inserção no sistema de 9 dB o que pode ser considerado um problema para sistemas PON de longas distâncias.

Para trabalhos futuros, pretende-se realizar montagens experimentais para comparação com os resultados simulados.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERENCIAS

- [1] S. Bindhaiq A. Sahmah, M. Supa'at, N. Zulkifli, A. B. Mohammad, R. Q. Shaddad, M. A. Elmagzoub and A. Faisal. "Recent development on time and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation passive optical network stage 2 (NG-PON2)," *Optical Switching and Networking*, vol. 15, pp. 53-56, January 2015.
- [2] D. Nasset, "NG-PON2 Technology and Standards," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 5, pp. 1136-1143, 1 March 2015. doi: 10.1109/JLT.2015.2389115
- [3] D. Nasset, "The PON roadmap," *2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, Anaheim, CA, 2016, pp. 1-2.
- [4] V. Kachhatiya and S. Prince, "Analysis of dense wavelength division multiplexed passive optical network (DWDM-PON)," *2017 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, Chennai, 2017, pp. 1974-1978.
- [5] D. V. N. Coelho, P. Marciano, T. V. N. Coelho, M. Segatto and M. J. Pontes, "Frequency Domain Interleaving for Dense WDM Passive Optical Networks", *Journal of Microwave, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 18, n° 2, pp. 196-207, 2019.
- [6] Coutinho, Bruno C., Lima, Fabio O., Lima Jr, Ivan T., Garcia, Anilton Salles and Segatto, Marcelo E. V.. (2016). A Multilayer Approach for Optical Network Planning. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 15(1), 49-4.
- [7] C. Lei, Y. Yu, M. Chen, H. Chen, S. Yang, and S. Xie, "Temporally Controlled Wideband Optical Frequency Comb Generation based on Recirculating Frequency Shifting," *International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP) and the 2014 9th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (APMP)*, pp. 272-275, Oct. 2014.
- [8] V. Torres-Company and A. M. Weiner, "Optical frequency comb technology for ultra-broadband radio-frequency photonics," *Laser Photonics Rev.* 8, No. 3, 368–393, 2014.
- [9] D. Hillerkuss, T. Schellinger, M. Jordan, C. Weimann, F. Parmigiani, B. Resan, K. Weingarten, S. Ben-Ezra, B. Nebendahl, C. Koos, W. Freude and J. Leuthold, "High-Quality Optical Frequency Comb by Spectral Slicing of Spectra Broadened by SPM," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 5, no. 5, pp. 7201011-7201011, Oct. 2013.
- [10] P. R. N. Marciano, D. V. N. Coelho, J. A. L. Silva, M. J. Pontes, and M. E. V. Segatto, "A New All-Optical OFDM Architecture for NG-PON2,"

in *Latin America Optics and Photonics Conference, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2018)*, paper W3D.4.

- [11] Coelho, Diogo; Marciano, P.; Nunes, R. B.; Segatto, M. E. V.; Pontes, M. J. "New Architecture Proposal to Enhance Spectrum Efficiency in Multiwavelength Optical Access Networks". In: *MOMAG 2016, 2016, Porto Alegre. 12^o Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo & 17^o Simpósio Brasileiro de Micro-Ondas e Optoeletrônica, 2016.*