

# Inserção de Rótulos Ópticos Através da Mistura de Quatro Ondas

Marcelo L. F. Abbade, Ricardo S. Braga, Eric A. M. Fagotto, Felipe R. Barbosa, Edson Moschim e Iguatemi E. Fonseca

**Resumo**—Propomos uma nova técnica para a inserção de rótulos em sinais ópticos. Essa técnica é baseada na multiplexação em amplitude de sinais, gerada pela mistura de quatro ondas, e resulta em pacotes representados por sinais ASK-4. Nossos resultados indicam que esses pacotes podem ser roteados por escalas de redes metropolitanas.

**Palavras-Chave**— Rótulos ópticos, multiplexação óptica, mistura de quatro ondas, sinais ASK-4.

**Abstract**—We propose a new technique for inserting labels in optical signals. This technique is based on the signal amplitude multiplexing, generated by four-wave mixing, and results in optical packets represented by ASK-4 signals. Our results indicate that these packets may be routed over a metropolitan network scale.

**Index Terms**— Optical labels, four-wave mixing, optical multiplexing, ASK-4 signals.

## I. INTRODUÇÃO

O aumento do tráfego da Internet tem estimulado a evolução das redes ópticas atuais para uma plataforma de IP (*internet protocol*) sobre WDM (*wavelength division multiplexing*) [1]-[2], na qual os dados IP poderiam ser roteados e transmitidos sem a necessidade de detectar o conteúdo dos pacotes [3]. Para isso, torna-se necessário a inserção de rótulos ópticos responsáveis pelo roteamento, aprovisionamento, manutenção e restauração dos caminhos ópticos (*light-paths*) comutados [4]. A literatura [4]- [10] aponta várias técnicas, baseadas na multiplexação por sub-portadora ou na utilização de formatos ortogonais de modulação, que permitem a inserção desses cabeçalhos ópticos.

Também para atender melhor a demanda exigida pelo tráfego crescente, vários estudos têm sugerido a utilização de codificações mais eficientes que a codificação *on-off keying* (OOK) normalmente utilizada [11]- [15]. Em particular, [16]- [18]

Marcelo L.F. Abbade, Ricardo S. Braga e Eric A. M. Fagotto, Faculdade de Engenharia Elétrica, PUC-Campinas, Brasil, E-mails: [abbade@puc-campinas.edu.br](mailto:abbade@puc-campinas.edu.br). Edson Moschim e Iguatemi E. Fonseca, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP, Campinas, Brasil. Felipe R. Barbosa, Fundação CPqD, Campinas.

propõem uma técnica na qual dois sinais OOK, com a mesma taxa de transmissão e em portadoras ópticas distintas, podem ser multiplexados em amplitude para gerar um único sinal ASK-4 (*quaternary amplitude shift keying*). Essa multiplexação óptica de amplitudes é realizada em uma fibra altamente não-linear de dispersão deslocada (HNL-DSF- *highly nonlinear dispersion shifted fiber*), através da mistura de quatro ondas (*FWM- four wave mixing*), e pode duplicar a eficiência espectral da fibra, em um regime de transmissão linear [18].

Nesse trabalho, nós sugerimos que a técnica proposta em [16]- [18] seja utilizada para inserir um rótulo óptico, de baixa taxa de transmissão, a um sinal transmitindo dados a altas taxas (*payload*). Dessa forma o sinal ASK-4 resultante representará um pacote óptico que poderá ser comutado de forma transparente e propagado por uma rede óptica. No melhor de nosso conhecimento, essa é a primeira vez que a geração e a propagação de sinais ópticos ASK4, compostos por tributários binários de taxas diferentes, são analisadas em detalhes.

A organização do trabalho é a seguinte. As Seções II e III apresentam, respectivamente, uma revisão sobre a técnica de multiplexação de amplitude proposta em [16]- [18] e sobre a recuperação dos tributários binários a partir do sinal ASK-4 resultante dessa técnica [16]. A Seção IV descreve e mostra, através de simulações, como esta técnica pode ser utilizada para permitir a inserção óptica de cabeçalhos. A Seção V aborda a comutação dos pacotes ópticos resultantes e analisa, também através de simulações, a transmissão desses pacotes em uma escala de rede metropolitana. Por fim, as conclusões e as perspectivas para continuação do trabalho são apresentadas na Seção VI.

## II. MULTIPLEXAÇÃO DE AMPLITUDES ATRAVÉS DA FWM

No caso degenerado da mistura de quatro ondas [19], dois canais sendo co-propagados nas frequências ópticas  $f_1$  e  $f_2$  ( $f_1 < f_2$ ) serão submetidos às não-linearidades da fibra e gerarão dois canais laterais localizados nas frequências  $f$  e  $f_+$ , dadas por:

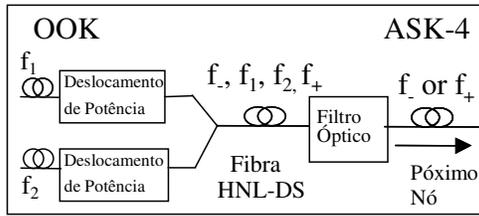


Fig. 1: Diagrama ilustrativo da multiplexação óptica de amplitudes gerada pela mistura de quatro ondas.

$$f_{-,+} = 2f_{1,2} - f_{2,1} \quad (1)$$

Se os canais principais ( $f_1$  e  $f_2$ ) possuírem a mesma polarização e forem fracamente depletados, os canais gerados ( $f_+$  e  $f_-$ ) receberão uma potência óptica que pode ser estimada por [20]:

$$P_{-,+} = \eta\gamma^2 P_{1,2}^2 P_{2,1} \exp(-\alpha L) \left[ \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \right]^2 \quad (2)$$

na qual  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_-$  e  $P_+$  são, respectivamente, a potência óptica dos canais em  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_-$  e  $f_+$ ,  $L$  é o comprimento da fibra,  $\alpha$  é a atenuação da fibra,  $\gamma$  é o coeficiente não-linear da fibra e  $\eta$  é a eficiência de geração da FWM, que depende do comprimento de onda e da intensidade da transmissão e está bem descrita na literatura [20].

A codificação OOK ideal resultará em uma potência,  $P_{-,+}$ , nula sempre que um dos canais principais transmitir um bit 0. Entretanto, em esquemas mais gerais de codificação, é fisicamente razoável assumir que os canais gerados conterão informação de ambos os sinais que se propagam nas frequências  $f_1$  e  $f_2$ .

Em particular, se os canais principais forem codificados com uma potência não nula para representar os bits 0, a Eq. (2) prevê que os sinais gerados podem assumir quatro níveis diferentes, que designaremos, em ordem crescente de potência, por  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  e  $\varepsilon_3$ . Esses quatro níveis são consequência das combinações de bits (00, 01, 10 e 11) que podem ser transmitidas pelos canais principais e caracterizam uma codificação ASK-4.

A discussão anterior sugere que as fibras podem operar como multiplexadores ópticos, de acordo com o diagrama ilustrado na Fig. 1. Os dois canais principais com codificação OOK têm as potências do bit 0 deslocadas para um valor não-nulo e são inseridos em uma fibra que, devido à ação da FWM, atuará como um multiplexador de amplitudes. Após a propagação por um determinado comprimento ao longo da fibra multiplexadora um dos canais ASK-4 gerados (em  $f_+$  ou  $f_-$ ) pode ser selecionado por um filtro passa-faixa e encaminhado para o próximo nó

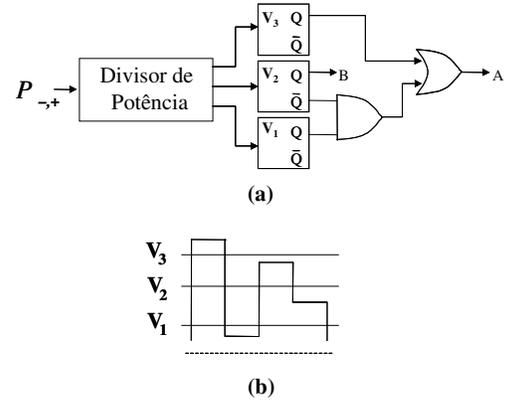


Fig. 2: (a) Circuito de Decisão responsável pela recuperação dos Tributários Binários; (b) Limiares de tensão para recuperação dos tributários binários.

óptico. Esse processo duplica a eficiência espectral para um único canal de transmissão e será mais eficiente, em termos da potência  $P_{-,+}$ , se uma fibra HNL-DS for utilizada. É importante notar que essa técnica de multiplexação óptica de amplitudes sempre provoca uma conversão de comprimentos de onda e admite, a princípio, que os bits dos canais principais estão sincronizados.

Neste trabalho, nós propomos que a técnica acima descrita seja utilizada para multiplexar opticamente dois sinais de taxas diferentes, sendo que o sinal de taxa mais baixa representará um rótulo óptico, conforme será descrito na Seção IV. Antes de apresentarmos essa proposta é conveniente discutir como é feita a detecção do sinal ASK-4 gerado a partir da multiplexação de amplitudes.

### III. RECEPÇÃO DOS SINAIS MULTIPLEXADOS EM AMPLITUDE ATRAVÉS DA FWM

A detecção direta pode ser utilizada no receptor para converter o sinal quaternário óptico, modulado em intensidade, para um sinal ASK-4 elétrico. Os tributários binários, transmitidos por  $f_1$  e  $f_2$ , podem, então, ser recuperados a partir do circuito decodificador ilustrado na Fig. 2a [16]. Este circuito contém três circuitos de decisão independentes, para os quais:

$$Q = \begin{cases} 1 & \text{se } v > V_i \\ e & \\ 0 & \text{se } v < V_i \end{cases} \quad (3)$$

sendo  $v$  a tensão elétrica associada à potência elétrica de entrada do sinal ASK-4 e  $V_i$  ( $i=1, 2$  ou  $3$ ) as tensões de limiar indicadas na Fig. 2b. A saída A fornecerá o bit recebido em  $f_1$  e a saída B fornecerá o bit recebido em  $f_2$ .

#### IV. UTILIZAÇÃO DA MULTIPLEXAÇÃO DE AMPLITUDES ATRAVÉS DA FWM PARA INSERÇÃO DE CABEÇALHOS ÓPTICOS

A técnica de multiplexação descrita na Seção II foi inicialmente proposta para multiplexar sinais de mesma taxa de transmissão e aumentar a eficiência espectral da fibra [16]-[18]. Nessa seção, nós verificamos, através de simulações, que essa técnica também pode multiplexar sinais de taxas diferentes e que, conseqüentemente, pode ser utilizada para inserir um cabeçalho óptico de baixa taxa a um sinal de dados de alta taxa de transmissão.

Essas simulações foram realizadas através do software *LightSim*, que utiliza um algoritmo de *split-step* Fourier para simular a transmissão de sinais por fibras ópticas e está sendo desenvolvido pela Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP. Nessas simulações, admitimos  $f_1 = 193.30$  THz e  $f_2 = 193.40$  THz e que o nível de potência dos bits 0 é inicialmente deslocado para 5 mW. As taxas de extinção dos sinais em  $f_1$  e  $f_2$  são escolhidas de tal forma que as razões entre os níveis de potência obedeçam, aproximadamente, uma relação quadrática ( $\epsilon_0 = 0$ ,  $\epsilon_2 = 4\epsilon_1$ , e  $\epsilon_3 = 9\epsilon_1$ ) que minimiza a probabilidade de erro no caso de o ruído ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) [16]- [18] ser dominante. A fibra multiplexadora escolhida é caracterizada por  $\alpha = 0.61$  dB/km,  $\gamma = 13.8$  (W.km)<sup>-1</sup>, inclinação de dispersão  $S_0 = 0.03$  ps/(nm<sup>2</sup>.km), comprimento de onda de dispersão nula  $\lambda_0 = 1550$  nm e possui um comprimento de 2 km. O sinal ASK-4 é selecionado em  $f_+ = 193.5$  THz e amplificado (~8 dB) de forma que o segundo nível de potência,  $\epsilon_1$ , tenha uma valor típico de 1 mW de potência de pico.

A Fig. 3 ilustra o pacote resultante da multiplexação de um rótulo de 1 Gb/s com um sinal de dados de 10Gb/s. Conforme sugerido pela descrição da Seção II, o pacote extraído em  $f_+$  corresponde a um sinal ASK-4. A seqüência de bits utilizada no rótulo óptico está indicada no topo da figura. A Fig. 3a representa o pacote obtido quando o sinal de dados está em  $f_1$  e o cabeçalho é colocado em  $f_2$  e a Fig. 3b representa o caso no qual o sinal de dados está em  $f_2$  e o rótulo é colocado em  $f_1$ .

No caso da Fig. 3a, observamos que sempre que um bit 0 for enviado pelo rótulo óptico, o pacote assumirá os níveis  $\epsilon_0$  ou  $\epsilon_2$  que correspondem, respectivamente, ao envio de bits 0 e 1 pelo sinal de dados. Também observamos que, sempre que um bit 1 for enviado pelo rótulo, o pacote assumirá os níveis  $\epsilon_1$  ou  $\epsilon_3$  que correspondem, respectivamente, ao envio de bits 0 e 1 pelo sinal de dados. Assim, a detecção dos bits do sinal de dados é bastante simples: os bits 0 correspondem aos níveis baixos de potência ( $\epsilon_0$  e  $\epsilon_1$ ) e os bits 1 correspondem aos níveis altos de potência ( $\epsilon_2$  e  $\epsilon_3$ ). Na detecção do rótulo os bits 0 serão representados pelos níveis  $\epsilon_0$  e  $\epsilon_2$  e os bits 1 serão representados pelos níveis  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_3$ .

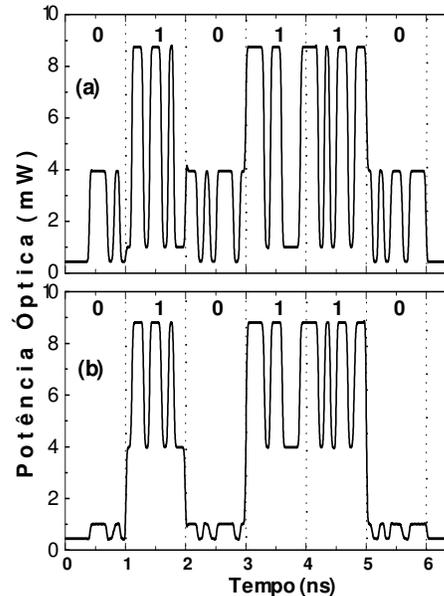


Fig. 3: Pacote óptico ASK-4 resultante da multiplexação em amplitudes de: (a) um sinal de dados em  $f_1$  a um rótulo óptico em  $f_2$ ; (b) um rótulo óptico em  $f_1$  a um sinal de dados em  $f_2$ ;

Uma análise similar mostra que, no caso da Fig. 3b, o rótulo óptico estará enviando um bit 0 ou um bit 1 sempre que, respectivamente, os níveis baixos ou altos forem transmitidos. De forma análoga, os níveis  $\epsilon_0$  e  $\epsilon_2$  indicarão que o sinal de dados transmitiu um bit 0 e os níveis  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_3$  indicarão que o sinal de dados transmitiu um bit 1.

A princípio o pacote óptico pode ter seu rótulo colocado tanto em  $f_1$  como em  $f_2$ . No entanto, devido à sua menor taxa de transmissão, a sensibilidade necessária para interpretar o rótulo será muito mais baixa que a sensibilidade necessária para ler o sinal de dados. Assim, na Seção V analisaremos a propagação e a comutação dos pacotes ópticos gerados considerando que o rótulo é colocado em  $f_2$ .

#### V. COMUTAÇÃO ÓPTICA DOS PACOTES GERADOS PELA MULTIPLEXAÇÃO DE AMPLITUDES ATRAVÉS DA FWM

Após a inserção dos rótulos ópticos descrita na seção anterior, o pacote ASK-4 resultante pode trafegar e ser comutado através da rede. Essa comutação pode ser realizada da seguinte forma. Ao atingir um dado nó o pacote seria dividido por um divisor de potência, sendo que parte do sinal seria transmitida para uma linha de atraso e a outra parte seria utilizada para a leitura do rótulo óptico. A detecção do rótulo óptico ocorreria da forma descrita na Seção III e determinaria a porta de saída a ser utilizada pelo pacote que trafega pela linha de atraso. Após passar pelo comutador óptico, este último pacote deve ser amplificado a fim de compensar as

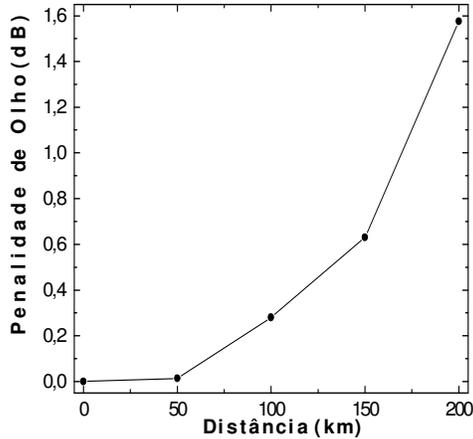


Fig. 4. Penalidade de olho experimentalada pelo pacote óptico ASK-4 ao longo da propagação por uma rede óptica com fibras NZD.

perdas experimentadas na linha de transmissão e no processo de comutação.

É interessante notar que durante o processo de comutação apenas o sinal de baixa taxa precisa ser detectado e que, no nó de destino, apenas o sinal de alta taxa precisa ser recuperado. Assim, uma característica importante da técnica de inserção de rótulos proposta neste trabalho é que, ao contrário do mencionado na Seção II para o caso de multiplexação de sinais com mesma taxa, não é necessário haver sincronização entre o início dos bits do sinal em  $f_1$  e o início dos bits do sinal em  $f_2$ .

A seguir, nós simulamos as condições de propagação do pacote ASK-4 por uma rede com enlaces de fibra de dispersão não-nula (NZD- *non-zero dispersion*). Os enlaces são constituídos por fibras de 50 km de comprimento, com  $\alpha = 0,22$  dB/km,  $\gamma = 2$  (W.km) $^{-1}$ , dispersão  $D(1530 \text{ nm}) = -2,9$  ps/(nm.km) e  $D(1560 \text{ nm}) = -0,7$  ps/(nm.km). Essas características são típicas das fibras LS<sup>®</sup> fabricadas pela Corning. Admite-se que na saída de cada nó um amplificador óptico a fibra dopada com Erbium (EDFA- *Erbium doped fiber amplifier*) amplifique idealmente o sinal de forma que a potência de  $\epsilon_1$  seja de 1 mW. Esse critério é novamente utilizado para manter certa compatibilidade com o valor típico de potência do segundo nível utilizado na codificação OOK.

A Figura 4 exibe a penalidade de olho em função da distância propagada. Admitindo uma penalidade de olho máxima de 1 dB, verificamos que o alcance do pacote ASK-4 é da ordem de 150 km. Os diagramas de olho do sinal em 0 km, logo após a inserção do rótulo óptico, e após 150 km de propagação estão ilustrados na Figura 5. As principais causas para a penalidade observada são a dispersão e, provavelmente, a automodulação de fase. Assim, acreditamos que o alcance de propagação do

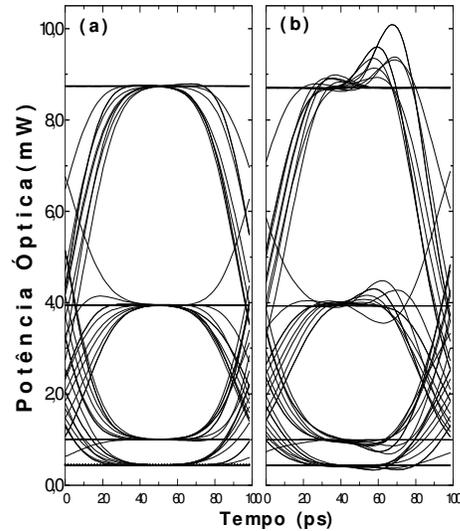


Fig. 5. Diagrama de olho do pacote óptico (a) em 0 km e (b) após 150 km de propagação.

pacote ASK-4 possa ser estendido se utilizarmos um esquema de compensação de dispersão nos nós ópticos e/ou diminuirmos a potência média transmitida pelo sinal ASK-4. Essas possibilidades estão atualmente sob investigação e poderão ser apresentadas em um trabalho futuro.

O espaçamento entre canais de  $\Delta f = f_2 - f_1 = 100$  GHz parece ser ótimo para as características consideradas da fibra multiplexadora. Nossas simulações indicam que um espaçamento de  $\Delta f = 50$  GHz está sujeito à ação da modulação cruzada de fase (XPM- *Cross Phase Modulation*) e tem seu alcance restrito a cerca de 100 km. Por outro lado, um espaçamento de canais de 150 GHz reduz a eficiência da FWM e o sinal precisa ser mais amplificado que no caso de  $\Delta f = 100$  GHz.

## VI. CONCLUSÕES

Nós apresentamos uma nova técnica para inserção de rótulos em pacotes ópticos. Essa técnica é baseada na multiplexação óptica de dois sinais OOK, de taxas diferentes, gerada a partir da mistura de quatro ondas. O pacote óptico resultante é um sinal ASK-4 e será obtido em uma portadora que corresponde ao batimento entre as frequências ópticas do sinal de dados e do rótulo óptico. Nossas simulações indicam que, um sinal de dados de 10 Gb/s pode ser multiplexado a um rótulo de 1 Gb/s e comutado a distâncias de 150 km em fibras NZD. Esses resultados são compatíveis com escalas de redes metropolitanas e sugerem que a técnica proposta poderia ser utilizada, por exemplo, por operadoras que desejarem realizar o chaveamento óptico dentro de um domínio específico da rede.

Apesar de este trabalho utilizar uma fibra

altamente não-linear como meio para a multiplexação entre os dados e o rótulo óptico, outros meios não-lineares, como os amplificadores ópticos a semicondutores (SOA – *semiconductor optical amplifiers*) também poderiam ser utilizados. Esse caso, que está sendo investigado atualmente, deve apresentar um menor custo para o dispositivo multiplexador mas, por outro lado, a eficiência da multiplexação deve ser bastante inferior à da HNL-DSF.

Um trabalho recente [21] sugere que a modulação cruzada de fase pode substituir a mistura de quatro ondas no processo de multiplexação óptica de amplitudes de dois sinais OOK. Assim, a XPM também poderia ser utilizada para multiplexar dois sinais de taxas diferentes e introduzir um rótulo a um pacote, sem a necessidade de conversão de comprimento de onda. Entretanto, nossos resultados preliminares indicam que a eficiência da XPM em fibras HNL-DSF é muito menor que a eficiência da FWM e portanto a potência requerida para deslocar o nível de potência dos bits 0 é consideravelmente maior que a requerida pela FWM.

Atualmente existem diversas técnicas de inserção de rótulos em pacotes ópticos, destacando-se as técnicas de SCM, rotulamento Ortogonal, OCDM, TDM Síncrono, TDM Assíncrono e WDM [22]. Um estudo minucioso comparando a técnica proposta no presente trabalho frente às demais será apresentado em um trabalho futuro.

#### REFERÊNCIAS

- [1] N. Ghani, "Lambda-labeling: A Framework for IP-over-WDM using MPLS," *Opt. Networks Mag.* vol. 1, no. 2, pp. 45-58, 2000.
- [2] C. Skoufifis, S. Sygletos, N. Leligou, C. Matrakidis, I. Pountourakis, and A. Stavdas, "Data Centric networking using multiwavelength Headers/Labels in Packet over WDM Networks: A Comparative Study," *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, no. 10, Oct. 2003.
- [3] D. J. Blumental, "All-optical label swapping networks and technologies," *J. Lightwave Technol.*, vol. 18, pp. 2058-2075, Dec. 2000.
- [4] N. Chi, J. Zhang, P. V. Holm-Nielsen, C. Peucheret, P. Jeppensen, "Transmission and Transparent Wavelength Conversion of an Optically Labeled Signal Using ASK/DPSK Orthogonal Modulation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 5, May 2003.
- [5] B. Meagher, G.K. Chang, G. Ellinas, Y.M. Lin, W. Xin, T.F. Chen, X. Yang, A. Chowdhury, J. Young, S.J. Yoo, C. Lee, M.Z. Iqbal, T. Robe, H. Dai, Y.J. Chen, and W.I. Way, "Design and implementation of ultra-low latency optical label switching for packet-switched WDM networks", *J. Lightwave Technol.*, vol. 18, issue 12, pg.1978-1987, Dec 2000.
- [6] M. Hickey, C. Barry, C. Noronha, and L. Kazovsky, "Experimental PSK/ASK transceiver for the STARNET WDM computer communication network," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 5, 568-571 (1993)
- [7] T. Koonen, G. Morthier, J. Jennen, H. Waardt, and P. Demeester, "Optical packet routing in IP-over-WDM networks deploying two-level optical labeling," Proceedings of the 27th European Conference on Optical Communications 2001 (ECOC 2001) (Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 2001), pp. 608-609.
- [8] T. Koonen, Sulur, I. Monroy, J. Jennen, and H.Waardt, "Optical labeling of packets in IP-over-WDM networks," in Proceedings of the 28th European Conference on Optical Communications 2002 (ECOC 2002) (Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 2002), paper 5.5.2 (2002).
- [9] T. Kawanishi, T. Sakamoto, S. Shinada, M. Izutsu, K. Higuma, T. Fujita and J. Ichikawa, "High-speed optical FSK modulator for optical packet labeling", OFC 2004 PD16, Los Angeles, USA, 22-27 Feb.2004.
- [10] F. Rudge Barbosa, Décio Maia, L. Pezzolo, A. C. Sachs, M.R.Salvador "Optical Packet Switching Node for Metro-Access Networks", ECOC'2001, Amsterdam, Sept. 2001.
- [11] R. Ramaswami, K.N. Sivarajan, "Optical Networks: A Practical Perspective", 2nd ed., Morgan Kaufmann Publishers- Academic Press, 2002, pp 249-250.
- [12] K. Yonenaga, S. Kuwano, S. Norimatsu, N. Shibata, "Optical duobinary transmission system with no receiver sensitivity degradation," *Electron. Lett.*, vol. 31, no 4, pp. 302- 303, 1995.
- [13] S. Walklin, J. Conradi, "Multilevel signaling for increasing the reach of 10 Gb/S lightwave systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, no 11, pp. 2235-2248, Nov. 1999.
- [14] W. Idler, B. Franz, D. Schlump, B. Wedding, A. J. Ramos., "Field trial at 40Gbit/s over 28.6km and 86km of standard singlemode fibre using quaternary dispersion supported transmission", *Electr. Lett.*, pp. 2425-2426, Dec. 1998.
- [15] Avlonitis N. S., Yeatman E.M. "Performance of 4-ary ASK for optical communication systems in dispersive, nonlinear environments" 8th IEEE High Frequency Postgraduate Colloquium, Belfast, U.K., Sept. 8-9, pp. 56-59 (2003)
- [16] M.L.F. Abbade, PhD thesis (in Portuguese), State University of Campinas (UNICAMP), Brazil, 2001.
- [17] I.E. Fonseca, E. Moschim, M.L.F. Abbade, "Optical Multiplexing through FWM in Highly Nonlinear Fibers: A Novel Device", International Telecommunications Symposium, Natal, Brazil, 2002.
- [18] M.L.F. Abbade, E.A.M. Fagotto, R.S. Braga, I.E. Fonseca, E. Moschim, and F.R. Barbosa, "Optical Amplitude Multiplexing through Four-Wave Mixing in Optical Fibers", aceito para o 11<sup>th</sup> International Conference on Telecommunications, Fortaleza- CE, Brazil, Aug 2004.
- [19] G.P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 3rd ed., San Diego, N.Y., U.S.A.: Academic Press, 2001, pp. 389-412.
- [20] N. Shibata, R.P. Braun, R.G. Waarts, "Phase-mismatch dependence of efficiency of wave generation through four-wave mixing in a single-mode optical fiber," *IEEE J. of Quantum Electron.*, vol. QE-23, no 7, pp. 1205-1210, Jul. 1987.
- [21] M.L.F. Abbade, R.S. Braga, E.A.M. Fagotto, E. Moschim , and I.E. Fonseca, "Multiplexação Óptica de Amplitudes Através da Modulação Cruzada de Fase", submetida ao SBMO, 2004.
- [22] I. T. Monroy, H.P.A. van den Boom, A.M.J. Koonen, G.D. Khoe, Y. Watanabe, Y. Koike and T. Ishigure, "Data transmission over polymer optical fibers". *Optical Fiber Technology* 9, 2003, pp. 159-171.