

Avaliação do Desempenho de Sistemas Utilizando um Anel de Recirculação Óptico

Hoan Carlo L. Monteiro, Suzanne Baruh, Maria Aparecida G. Martinez
Mônica de L. Rocha, Miriam Regina X. de Barros

Resumo — Nós investigamos numericamente a confiabilidade da utilização de um anel de recirculação óptico (RCL) em prever o desempenho de um sistema e os efeitos causados pelo cascadeamento de elementos ópticos em um sistema de transmissão. Para validar esta ferramenta, nós conduzimos simulações numéricas do anel de recirculação baseadas em duas demonstrações experimentais: (i) dez voltas no anel com um único canal, modulado a 10 Gb/s, em um enlace de 25 km por volta e (ii) um sistema de transmissão WDM usando um *optical add-drop multiplexer* (OADM), baseado na tecnologia de fibra com grade de Bragg. Os resultados experimentais e de simulação apresentaram-se de acordo.

Palavras - chaves — Anel de Recirculação, Optical Add-Drop Multiplexer (OADM), Grades de Bragg, Comunicação por Fibra Óptica, Sistemas WDM, Sistemas de Longo Alcance.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, em função das limitações de verbas e recursos materiais nos laboratórios de pesquisa, uma poderosa ferramenta tem sido usada para desempenhar análises experimentais, o Anel de Recirculação Óptico (RCL). Com o uso do RCL é possível avaliar, por exemplo, a influência do acúmulo da dispersão cromática na degradação da taxa de erro (BER), em toda uma rede óptica, sem ter que montar um sistema ou uma rede completa. Dessa forma, apenas poucos nós ou amplificadores são necessários para tal avaliação [1].

Em 1988, foi demonstrada a primeira aplicação de um RCL em sistemas de comunicação, com o intuito de estudar a transmissão de sólitons com amplificação Raman [2]. Em 1991, o RCL foi usado para demonstrar a transmissão de canais ópticos modulados a 5 Gb/s em 9.000 km de fibra e a 2,5 Gb/s por 21.000 km de fibra, com uma BER mais baixa que 10^{-9} . Neste caso, o espaçamento entre os amplificadores era de 40 km de fibra e os lasers de bombeio Raman operavam em 1480 nm [3]. Ainda em 1991, a transmissão de sólitons modulados foi demonstrada a 10 Gb/s ao longo de 1.000.000 km de fibra, usando um RCL de 500 km, com doze amplificadores de linha. Em 1993, o mesmo experimento foi repetido para uma distância de 180.000.000 km de fibra [4].

Recentemente, os RCLs tem sido bastante usados para simular transmissões em distâncias transoceânicas de canais

WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) modulados a 10 Gb/s [5,6] e 40 Gb/s [7,8]. Estes experimentos incluem uma seqüência com muitos enlaces de fibras e amplificadores, EDFA (Amplificador com Fibra Dopada a Érbio) e Raman. Uma das grandes vantagens de se utilizar o RCL é a avaliação das técnicas de gerenciamento de dispersão e cascadeamento em longa distância, que não seria possível em um experimento em linha reta, devido ao grande número de carretéis de fibra e elementos em cascata, por exemplo, um OADM (Optical Add-Drop Multiplexer).

O crescimento na demanda por largura de banda está levando ao limite a utilização das infra-estruturas em fibras ópticas. Para suprir esta necessidade, os sistemas atuais de comprimento de onda único conectados em uma topologia ponto a ponto vêm sendo substituídos pelos sistemas de vários comprimentos de onda (DWDM). Em tais sistemas, o OADM é um dos elementos mais simples capaz de gerenciar comprimentos de onda, através da adição ou retirada de canais ópticos.

Nós propusemos estudar a confiabilidade de uma ferramenta de simulação para validar o uso de RCLs em análises de desempenho experimental de sistemas WDM. Em nossos estudos, a meta mais importante é avaliar os efeitos do cascadeamento de elementos espaçados por distância em escala metropolitana. Nós conduzimos uma simulação numérica do RCL, com e sem OADM, reproduzindo as condições experimentais. Neste trabalho, o OADM é baseado em fibra com grade de Bragg (FBG). As simulações foram realizadas pelo software *VPI Transmission Maker*.

O artigo é organizado como segue. A seção II sumariza o uso do RCL na transmissão monocal em longa distância por uma cascata de amplificadores ópticos, e sem OADM. O RCL usado para uma transmissão WDM é apresentado na seção III, usando um OADM. Finalmente, na seção IV nós apresentamos as conclusões do nosso trabalho.

II. USO DO RCL EM SISTEMAS DE LONGO ALCANCE

Nosso RCL experimental consiste, basicamente, de um acoplador de 3 dB de quatro portas, um amplificador óptico de linha, um carretel de fibra e dois atenuadores ópticos. O sinal é injetado no anel por duas chaves acusto-ópticas. Uma, localizada antes da entrada do anel, “carrega” o anel com uma seqüência de bits, uma outra, posta dentro do anel, mantém a seqüência de bits por um intervalo de tempo desejado. Ambas as chaves operam a uma velocidade de 27 MHz e elas são controladas por dois geradores de função

¹ Hoan Carlo L. Monteiro, hoancar@mackenzie.br, Suzanne Baruh, suzanne@mackenzie.br, Tel 11-32368711, Fax 11-32368711; Maria Aparecida G. Martinez, magmartinez@mackenzie.br. Os Autores estão com a Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP, Brasil. Mônica de L. Rocha e Miriam R. X de Barros estão com o CPqD Telecom & IT Solutions, Campinas, SP, Brasil. (e-mail: monica@cpqd.com.br)

Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES e pelo Fundo Mackenzie de Pesquisa (MACKPESQUISA).

sincronizados, que também comandam o detector de BER. A Figura 1 mostra o esquema experimental de um RCL.

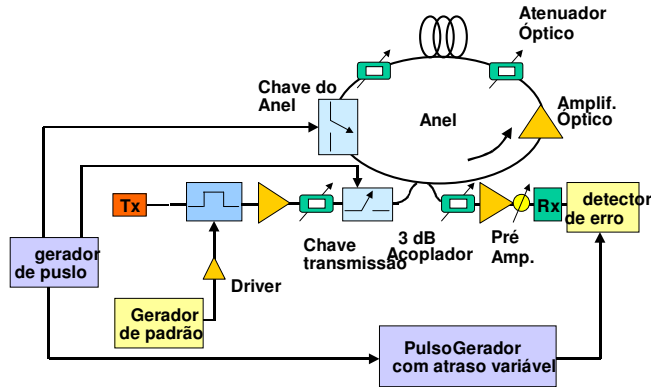


Figura 1 – Esquema experimental do anel de recirculação usando duas chaves ópticas e um acoplador de 3 dB.

O RCL no ambiente de simulação não necessita de quaisquer equipamentos ou chaves para a sincronização do sistema e a seqüência de bits é injetada no anel por ajustes de parâmetros. Os dois atenuadores são colocados dentro do anel para regular a potência nos pontos críticos, isto é, na entrada e saída da fibra. Os monitores de potência são usados para garantir o balanço de potência nestes pontos, ao longo das voltas no anel.

O balanço de potência no anel é um aspecto crítico, tanto para os experimentos quanto para as simulações, e exige ajustes cuidadosos. A perda no anel deveria ser de 0 dB, porém, haverá algum acréscimo ou redução de potência durante as voltas. Os valores de potências fixados foram:

- Na entrada da fibra: 8.1 dBm
- Na entrada do amplificador de linha no anel: -4.1 dBm
- Na entrada do pré-amplificador (fora do anel): -35 dBm

O amplificador de potência produz um ganho de saturação fixo de 19 dB, o amplificador de linha de 21 dB e o pré-amplificador de 35 dB. A sensibilidade do receptor é de -35 dBm, que garante uma BER de 10^{-9} .

A dispersão acumulada para cada volta é de 63,2 ps/nm [1]. A Figura 2 mostra uma típica medida da evolução de BER para dez voltas do sinal no anel de recirculação.

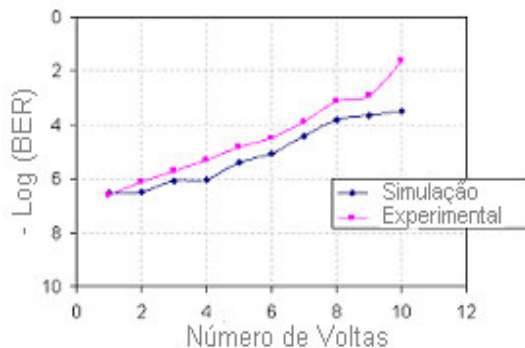


Figura 2 – Evolução da BER após 10 voltas no RCL.

Nós investigamos os resultados de uma transmissão com um único canal modulado a 10 Gb/s com PRBS de ordem 23 e código NRZ, para o comprimento de onda de 1576,5 nm. Foi utilizada uma fibra com dispersão deslocada (DS) em 1550 nm (dispersão nula) de 25 km de comprimento, inclinação da dispersão de 0,095 ps/nm²km e atenuação de 0,2 dB/km.

Os resultados, experimental e de simulação, mostraram-se equivalentes. Variações do coeficiente de dispersão da fibra na ordem de 5% ou uma potência ligeiramente desbalanceada no anel, resulta em pequenos desvios na curva simulada de BER em relação aos pontos experimentais.

A simulação numérica pode ser usada para prever as penalidades e o desempenho do RCL.

III. USO DO RCL EM SISTEMAS WDM

A funcionalidade do OADM é demonstrada utilizando-se o esquema experimental na Figura 3. Três lasers espaçados de 200 GHz (~ 1,6 nm), conforme o padrão ITU (1549,32 nm, 1550,92 nm e 1552,52 nm) são externamente modulados, a uma taxa de 2,5 Gb/s, com PRBS de ordem 7 e código NRZ. No enlace, são usados 50 km de fibra DS. Um EDFA é utilizado para prover a potência necessária para compensar as perdas no enlace e no OADM.

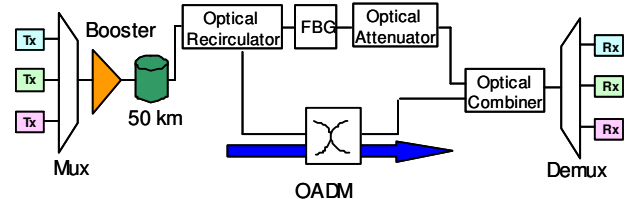


Figura 3 – Esquema do OADM no experimento de transmissão WDM em linha reta [9].

O desempenho do OADM está relacionado com as características espectrais da grade de Bragg (FBG). A FBG tem o comprimento central de reflexão em 1550,92 nm, com uma banda passante de 1,4 nm para a largura de banda de -20 dB e a rejeição de potência para os canais adjacentes é de 28,1 dB. As Figuras 4 e 5 mostram as características espectrais do OADM, apresentando o espectro de potência dos sinais na entrada do OADM e o espectro do sinal retirado (*drop*), respectivamente.

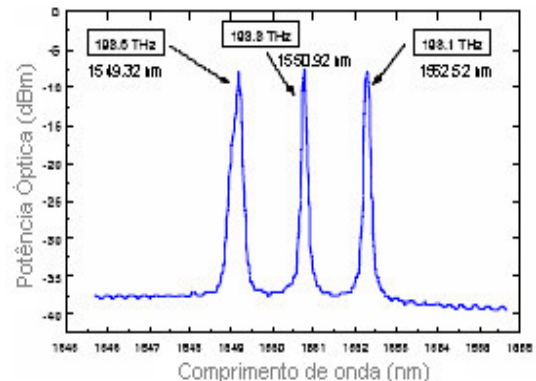


Figura 4 – Sinal na entrada do OADM [10].

Os dois pequenos componentes do sinal, presentes no sinal retirado, se devem às reflexões residuais (imperfeições) no circulador e na FBG.

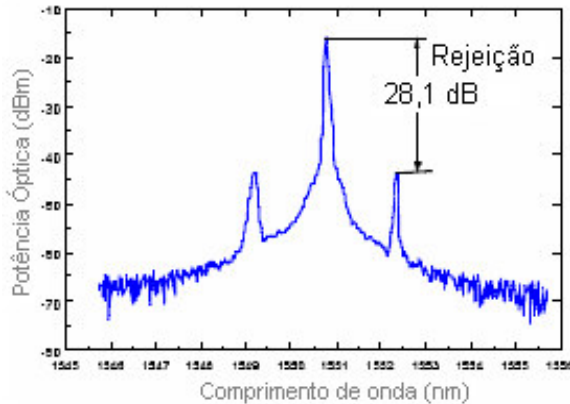


Figura 5 – Sinal retirado (*Drop*) [10].

A perda com a inserção do OADM é de 6 dB para todos os canais de entrada e a perda para o canal retirado é de 3,8 dB. A Figura 6 mostra a evolução da BER em função da potência no receptor, para 0 km de fibra (referência *back-to-back*), para o canal retirado no OADM após 50 km de propagação na fibra e para o mesmo canal com 50 km de fibra não sendo retirado no OADM [9]. A diferença de potência quando o canal é retirado no OADM e quando o mesmo é recebido diretamente deveria ser nula. Contudo, devido a incertezas experimentais, esta diferença é aproximadamente 0,08 dB, que não é um valor significativo.

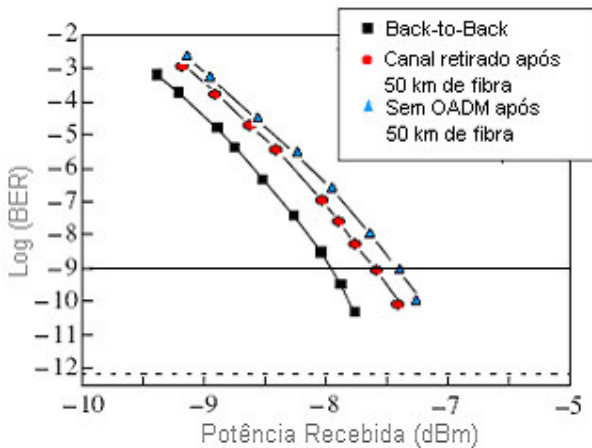


Figura 6 – Desempenho experimental da BER para o canal retirado [11].

Nós notamos que a penalidade de potência para o canal retirado em uma BER de 10^{-9} é de 0,2 dB (em relação à referência *back-to-back*). Este valor se deve ao *crosstalk* heterodino induzido pelo escape de potência dos dois componentes do sinal adjacente da Figura 5. Essas componentes residuais interferem no processo de recepção, resultando na adição de ruído no detector [10,11].

Para testar o OADM no ambiente de simulação, nós usamos três lasers, um multiplexador 4x1 com uma fonte nula, um atenuador, o módulo OADM e dois analisadores de espectro óptico, um na porta “*Add*” e outro na porta “*Drop*”. Os parâmetros do OADM foram exatamente ajustados às condições experimentais. As Figuras 7 e 8 mostram o ambiente de simulação e o sinal na porta “*Drop*”, respectivamente.

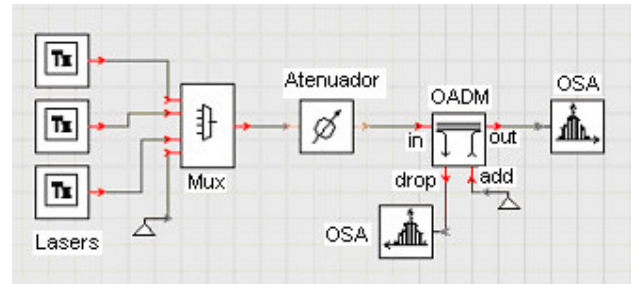


Figura 7 – Ambiente de simulação para testar o OADM.

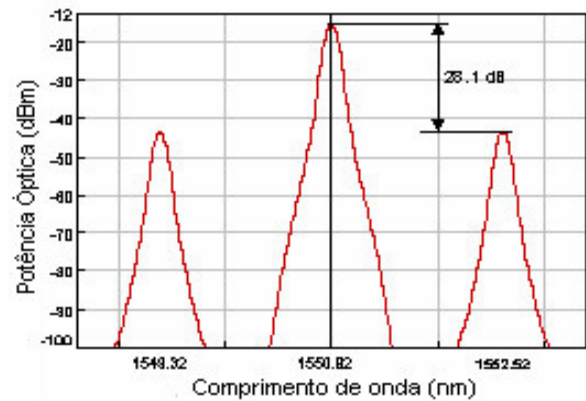


Figura 8 - Sinal na porta “*drop*”.

Nós utilizamos a mesma configuração básica, mostrada na Figura 1, para montar um ambiente de simulação projetado para estudar um caso particular do experimento em linha reta, isto é, o desempenho do canal retirado após 50 km de fibra. Nossa meta é avaliar o efeito de nossa técnica de balanceamento de potência através da inserção de 25 km de fibra e um amplificador de linha, dentro do RCL com duas voltas do sinal pelo mesmo. Note que o uso de tal configuração implica em um amplificador extra, em comparação ao modelo experimental.

Contudo, como a distância total de transmissão é curta, o acúmulo do ruído de emissão espontânea do amplificador, ruído ASE, não causará impacto significativo no desempenho do sistema. Uma outra diferença entre as configurações dos sistemas é que o receptor da simulação inclui um pré-amplificador com o intuito de manter a fidelidade com o RCL

original. Entretanto, o esquema da Figura 3 não possui pré-amplificação. Isso explica a diferença quantitativa entre as potências recebidas nas Figuras 6 e 10. Porém, os resultados qualitativos desejados entre as curvas foram obtidos com bastante precisão.

Em suma, para analisar o canal retirado, o RCL é configurado para duas voltas de 25 km de fibra. A potência do sinal na fibra, no amplificador de linha e pré-amplificador são as mesmas que foram descritas na seção II, sendo que a potência lida após o multiplexador é de 0 dBm. A Figura 9 ilustra esta montagem na qual, novamente, os atenuadores localizados dentro do anel são cuidadosamente ajustados para manter o balanço de potência.

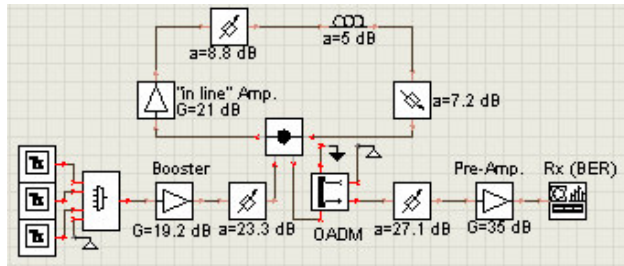


Figura 9 – Ambiente de simulação de um anel de recirculação com um OADM posto na saída.

Como esperado, a inclusão de um pré-amplificador óptico na simulação resultou em diferentes sensibilidades dos receptores, das condições experimentais e numéricas. Por esta razão, as potências recebidas (em dBm), para uma BER de 10^{-9} , foram diferentes. Entretanto, não levando em conta a melhoria de sensibilidade devido ao pré-amplificador, a penalidade de potência (relativa ao *back-to-back*) para o canal retirado pelo OADM após 50 km de fibra é a mesma, em torno de 0,2 dB, para ambas as investigações: experimental e simulação. Este resultado confirma que o balanço de potência foi realizado com sucesso e, com isso, a adição de um amplificador de linha extra não teve relevância no desempenho do sistema como um todo. A Figura 10 mostra o resultado de simulação no qual pode ser observado, como esperado, que a diferença de potência entre o canal retirado e o mesmo sendo recebido diretamente (não sendo retirado no OADM) é nula.

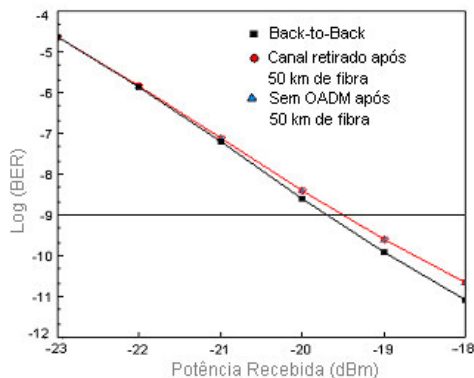


Figura 10 – Desempenho de simulação da BER para o canal retirado.

Assim como na condição experimental, esta pequena penalidade de potência pode ser atribuída ao *crossstalk* heterodino induzido pelo escape de potência dos dois componentes do sinal adjacente na Figura 8.

IV. CONCLUSÃO

O anel de recirculação óptica (RCL), uma ferramenta poderosa e de baixo custo, foi demonstrado experimental e numericamente em uma transmissão monocanal a 10 Gb/s como sendo uma ferramenta confiável para avaliar a transmissão em longo alcance e o cascadeamento de amplificadores ópticos por um enlace de 250 km de fibra DS. O projeto e a implementação de um RCL exige muita atenção em alguns fatores. Um deles é o balanço de potência dentro do RCL.

O desempenho de um sistema de três canais com um OADM, avaliado em um experimento de transmissão em linha reta também foi apresentado, e foi tomado como base para comparação do desempenho de um RCL no ambiente de simulação. Embora o simulador exija um amplificador extra para reproduzir o RCL experimental, o balanço de potência foi eficientemente ajustado de forma a não comprometer o desempenho do sistema. Assim, os resultados obtidos mostraram-se de acordo com as condições experimentais. Dessa forma, a simulação numérica pode ser usada para prever as limitações e o desempenho de um RCL experimental.

A configuração do OADM investigado é bastante relevante, como pode ser observado nas suas boas características espectrais, pois o OADM proporciona baixo *crossstalk* heterodino, e conseqüentemente, alto potencial de cascadeamento.

REFERÊNCIAS

- [1] S.Baruh, M.R.X. Barros, M.L. Rocha, M.R. Horiuchi, J.B. Rosolem, R. Arradi, S.M. Rossi, A. Paradiasi, M.T.M.R. Giralddi, and M.A.G. Martinez. "Experimental Demonstration and Numerical Simulation of na Optical Recirculating Loop Operating at 10 Gb/s". *Proceedings of International Microwave and Optoelectronic Conference - IMOC,2003, Brazil, 2003.*
- [2] L.F. Mollenauer, and K. Smith. "Demonstration of Soliton Transmission over more than 4000 km in Fiber with Loss periodically compensated by Raman Gain", *Optics Letters*, vol. 13, pp. 675-677, 1988.
- [3] N.S. Bergano, J. Aspell, C.R. Davidson, P.R. Trischitta, B.M. Nyman, and F.W. Kerfoot. "A 9000 km 5 Gb/s and 21,000 km 2.5 Gb/s feasibility demonstration of transoceanic EDFA systems using a circulating loop", *proceedings of SPIE*, vol. 1581, pp. 182-187, 1991.
- [4] M. Nakazawa, K. Suzuki, E. Yamada, H. Kubota, Y. Kimura, and M. Takaya. "Experimental demonstration of soliton data transmission over unlimited distances with soliton control in time and frequency domains", *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference, OFC '93*, paper PD7, pp. 299-301, 1993.
- [5] Y. Yamada, S. Nakagawa, Y. Kurosawa, T. Kawazawa, H. Taga, and K. Goto. "2 Tb/s (200x10 Gb/s) over 9240 km transmission experiment with 0.15 nm channel using VSB format", *Electronics Letters*, vol. 38 (7), pp. 328-330, 2002.
- [6] M. Mehendale, M. Vasilyev, A. Kobaykov, M. Williams, and S. Tsuda. "All-Raman transmission of 80 x 10 Gb/s WDM signals with 50 GHz spacing over 4160 km of dispersion managed fibre", *Electronics Letters*, vol. 38 (13), pp. 648-649, 2002.

- [7] H. Sugahara, K. Fukuchi, A. Tanaka, Y. Inada, and T. Ono. "6,050km Transmission of 32 /spl times/ 42.7 Gb/s DWDM signals using Raman-Amplified Quadruple-hybrid Span", *proceedings of Optical Fiber Communication Conference, OFC'02*, paper FC6, pp. 1-3, 2002.
- [8] H. Sugahara, M. Marisaki, T. Ito, K. Fukuchi, and T. Ono. "9,000 km transmission of 32x42.7 Gb/s dense - WDM signals using 195 μm^2 A_{eff} fiber and inverse double-hybrid span configuration", *proceedings of Optical Amplifiers and their Applications, OAA'02*, paper PDP3, pp. 235-238, 2002.
- [9] P.S. Andre, A.N. Pinto, J.L. Pinto, T. Almeida, and M. Pousa. "Optical Add/Drop Multiplexer Based on Fiber Bragg Grating for Dense Wavelength Division Multiplexing Networks", *Revista do Departamento de Eletrônica e Telecomunicações da Universidade de Aveiro, DETUA Magazine*, Aveiro, Portugal, 2001.
- [10] P.S. Andre, Componentes Optoelectrónicos para Redes Fotónicas de Alto Débito. *Thesis (Doctor in Electrical Engineering)* - University of Aveiro, Portugal, 2002.
- [11] P.S. Andre, A.N. Pinto, J.L. Pinto, T. Almeida, and M. Pousa. "Selective and Wavelength Transparent Optical Add/Drop Multiplexer Based on Fiber Bragg Gratings". *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 47, No. 12, pp. 1387-1397, 2002.