

Transmissão de 32 x 112 Gb/s com Modulação NRZ-DP-QPSK por 4050 km em Redes WDM com Alta Eficiência Espectral

Júlio C. R. F. Oliveira, Reginaldo Silva, Adolfo F. Herbster, Edson P. Silva, Vitor R. Bedotti, Júlio C. M. Diniz, Eduardo S. Rosa, Antônio A. Juriollo e Alberto Paradisi

Resumo - Neste trabalho é apresentada uma transmissão óptica experimental de 3,58 TB/s utilizando 32 canais modulados a 112 Gb/s com o uso do formato de modulação NRZ-DP-QPSK e detecção coerente. Os efeitos da filtragem óptica imposta pelos ROADMs em redes ópticas são analisados. Um alcance máximo de 4050 km é obtido em uma estrutura de propagação baseada em fibras de sílica pura e EDFAs como estrutura de amplificação.

Palavras-Chave — *Sistemas ópticos de alta velocidade, eficiência espectral, redes ópticas, filtragem óptica, formatos de modulação.*

Abstract—In this work is presented an experimental optical transmission at 3.58 TB/s using 32 channels modulated at 112Gb/s with NRZ-DP-QPSK modulation format with coherent detection. Optical filtering effects imposed by ROADMs in optical networks were analyzed. A maximum reach of 4050 Km was obtained in a pure silica fiber recirculation loop using EDFAs as amplification structure.

Keywords — *High speed optical systems, spectral efficiency, optical networks, optical filtering, modulation formats.*

I. INTRODUÇÃO

A contínua evolução dos meios de comunicação impulsionada pela disseminação da internet e seus aplicativos vem exercendo nas redes de telecomunicações uma contínua necessidade de aumento de capacidade [1]. Os sistemas de comunicações ópticas são apresentados como a principal solução de transmissão de alta velocidade capaz de atender à crescente demanda, porém, para isto, estes vêm passando por profundas modificações tecnológicas ao longo dos últimos anos. As redes ópticas evoluíram de redes baseadas em sistemas ponto a ponto com taxas de 2,5 Gb/s para redes ópticas reconfiguráveis a 100 Gb/s [2].

Em 10 Gb/s, os sistemas de transmissão óptica são baseados em modulação de intensidade (OOK), porém com o avanço das taxas de transmissão, a ocupação espectral necessária para a manutenção da grade DWDM (50 GHz) forçou a evolução das estruturas de transmissão e recepção com o intuito de aumento da eficiência espectral. Neste contexto, os sistemas de 40 Gb/s passaram a operar, em sua maioria, com estruturas de transmissão com modulação de fase e codificação diferencial com dois bits por símbolo (DQPSK), enquanto que a estrutura de recepção passou a necessitar de um interferômetro para a realização da recepção de forma diferencial, extraíndo a informação da diferença de fase entre bits sucessivos [3]. Nestes sistemas a eficiência espectral

evoluiu de 0,5 b/s/Hz (sistemas OOK) para 1b/s/Hz, tornando possível a transmissão de sinais a 40 Gb/s na grade DWDM. Porém, para sistemas operando a 100 Gb/s, é necessária uma eficiência espectral de 2 b/s/Hz para garantir uma ocupação espectral de um sinal óptico modulado a 100 Gb/s na grade DWDM. Para obter esta eficiência espectral, os sistemas de transmissão óptica atuais encontram-se em evolução adotando um formato de modulação baseado na multiplexação de polarização com modulação em fase. A utilização da modulação DP-QPSK induz os sistemas ópticos à necessidade de detecção coerente, devido à necessidade de recuperação da fase do sinal.

Por meio do uso de moduladores DP-QPSK em conjunto com o mecanismo de detecção coerente, torna-se possível a transmissão de sinais a 100 Gb/s na grade DWDM. O uso da detecção coerente, que possibilita a recuperação integral do campo elétrico do sinal recebido, torna possível o uso de forma *off-line* de algoritmos de processamento digital de sinais para minimização dos efeitos lineares e não lineares do canal de comunicação [4].

Neste trabalho é demonstrada a primeira transmissão óptica WDM experimental a 112 Gb/s reportada na América Latina. São apresentadas as estruturas do transmissor DP-QPSK, do anel de recirculação, da estrutura de recepção coerente, assim como os algoritmos de filtragem digital desenvolvidos para pós-processamento do sinal. Em um cenário de rede óptica baseada em ROADMs, o alcance de sistemas com ausência de filtragem e com filtros ópticos cascadeados de 50 GHz e 100 GHz são avaliados, apresentado a viabilidade da transmissão óptica de 32 x 112 Gb/s e definindo os limites impostos pela filtragem óptica em cada caso.

II. ARRANJO EXPERIMENTAL

O sistema óptico utilizado para o experimento de transmissão de 32 canais modulados a 112 Gb/s DP-QPSK é composto por três blocos, conforme ilustra a Figura 1. A fonte WDM do primeiro bloco, denominado de transmissor (Figura 1.a), consiste de 31 lasers DFB, cujos canais variam entre o C21 e C60, exceto o canal C41, da grade do ITU, espaçados com 100 GHz. Os lasers que compõem esta fonte possuem largura de linha inferior a 2 MHz e controladores independentes de polarização. O canal C41 consiste de um laser de cavidade externa sintonizável com largura de linha inferior a 100 kHz e controlador de polarização.

O conjunto de lasers e o canal C41 são modulados de formas independentes, utilizando moduladores ópticos DP-

Júlio C. R. F. Oliveira, Reginaldo Silva, Adolfo F. Herbster, Edson P. Silva, Vitor R. Bedotti, Júlio C. M. Diniz, Eduardo S. Rosa, Antônio A. Juriollo e Alberto Paradisi, Gerência de Tecnologias Ópticas, Fundação CPqD, Campinas, Brasil, E-mails: {julio, rdsilva, adolfo, edsons, vribeiro, diniz, eduardor, amauri, paradisi}@cpqd.com.br.

QPSK distintos, em que quatro linhas externas com sinais elétricos de 28 Gb/s NRZ de amplitude 7,0 Vpp ($2 \cdot V\pi$) são utilizadas para modular os canais ópticos com sequência de bits pseudo-aleatória (PRBS) com tamanho $2^{15}-1$, emulado a redundância de 7% do FEC e de protocolos de camadas superiores [5]. As saídas ópticas dos moduladores DP-QPSK são multiplexadas por meio de um acoplador óptico 1 x 2, para formar um sinal óptico composto por 32 canais ópticos modulados a 112 Gb/s DP-QPSK. Este sinal óptico é amplificado por um EDFA com potência máxima de saída de 21 dBm e modo de controle automático de ganho, sendo, em seguida, injetado no anel de recirculação.

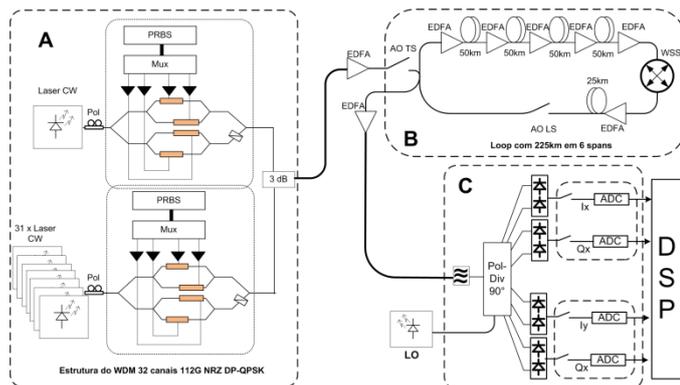


Fig. 1 - Diagramas de blocos das estruturas do sistema óptico: (A) transmissor; (B) anel de recirculação; (C) receptor.

O segundo bloco do sistema de transmissão, denominado de anel de recirculação (Figura 1.b), é controlado por duas chaves acusto-óptica (AO). Estas chaves operam de modo complementar, isto é, quando uma está aberta a outra está fechada. A chave AO TS é fechada por um tempo conhecido como tempo de injeção, em seguida esta é aberta e a chave AO LS é fechada permitindo a recirculação do sinal. O enlace de fibra do anel de recirculação é composto por quatro enlaces de 50 km e um enlace de 25 km de fibra de sílica pura, cuja atenuação é 0,176 dB/Km em 1550 nm, área efetiva de $80 \mu\text{m}^2$, dispersão cromática de 18,664 ps/nm em 1550 nm e dispersão de modo de polarização (PMD) abaixo de 0,0665 ps/ $\sqrt{\text{km}}$.

A perda por enlace é menor que 9,21 dB, sendo compensada por EDFAs com bombeio co-propagante de 980 nm, potência máxima de saída de 10 dBm e figura de ruído máxima de 4,6 dB sem filtro equalizador de ganho. Estes amplificadores operam em modo de controle de potência. Uma chave óptica reconfigurável (WSS) é inserida no final do enlace do anel de recirculação com a finalidade de equalizar o espectro óptico e realizar filtragem dos canais. Esta chave óptica é utilizada como filtro óptico de 100 e 50 GHz.

Uma parcela do sinal óptico propagado ao longo de 225 km é direcionada para um sistema de recepção onde o sinal é analisado (medidor de taxa de erros, analisador de espectro óptico, osciloscópio de amostragem, por exemplo). A outra parcela do sinal recircula no anel. Este direcionamento é realizado utilizando um acoplador óptico 2 x 2.

O terceiro bloco do sistema óptico, denominado de receptor (Figura 1.c), é composto por um pré-amplificador (EDFA) seguido de um filtro óptico sintonizável de largura 200 GHz, responsável pela filtragem do ruído óptico introduzido pelo sistema de amplificação e uma híbrida de 90°, responsável pela demodulação do sinal óptico DP-QPSK. Este componente realiza a conversão do campo magnético do sinal óptico para o domínio elétrico de forma linear [3], amostrado em seguida por conversores AD de alta-taxa e banda elétrica elevada, possibilitando aplicar técnicas de processamento digital e compensar os efeitos lineares e não-lineares sofridos pelo sinal ao longo de sua propagação.

III. PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

A partir do uso da detecção coerente, sendo necessário o batimento do sinal modulado com um oscilador local, a amostragem do sinal em banda base torna possível a aplicação de técnicas de processamento digital de sinais para minimizar os efeitos de camada física impostos pelo canal de comunicação até a completa recuperação da fase do sinal.

A Figura 2 ilustra a sequência de algoritmos usualmente aplicada na unidade DSP. O bloco de normalização e ortogonalização compensam distorções na híbrida de 90° e diferenças de potência entre as componentes em fase e quadratura usando o algoritmo de Gram-Schmidt [6]. O bloco Equalizador Estático faz a compensação da dispersão cromática acumulada durante a transmissão no domínio do tempo como em [7]. Um filtro de resposta ao impulso finita (FIR – *finite impulse response*) é usado para equalizar o sinal, com os coeficientes e tamanho calculados para corresponder a função de transferência inversa a da CD total. O bloco recuperação de sincronismo usa o algoritmo de Gardner [8] para recuperar o tempo de símbolo corretamente. O bloco Equalizador Dinâmico é responsável por demultiplexar as polarizações, a CD residual e ou outros efeitos que variam com o tempo como a PMD. O algoritmo utilizado nesse bloco é o CMA na configuração MIMO 2x2 (*multiple input multiple output*) usando quatro filtros FIR [4]-[7], como mostrado na Figura 2.

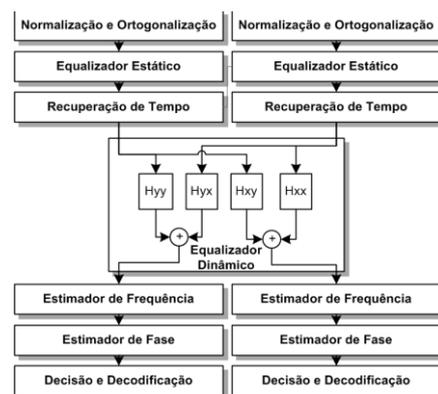


Fig. 2. Diagrama funcional da unidade DSP.

Após a equalização dinâmica, que realiza a demultiplexação das polarizações, é realizada a estimação de frequência [9], seguida pelo bloco de estimação de fase, através do algoritmo

FFPE (*feed-forward phase recovery*) [10]. Posteriormente ao estimador de fase é feita a decisão nos símbolos de cada polarização. A Figura 3 ilustra todas as fases do processamento digital após cada um dos algoritmos.

O sinal recebido após a propagação é penalizado pelos efeitos da camada física, sendo a dispersão cromática e a PMD os principais fatores que contribuem para o espalhamento dos bits, compensados pela filtragem digital, em que os resultados são ilustrados na Figura 3.

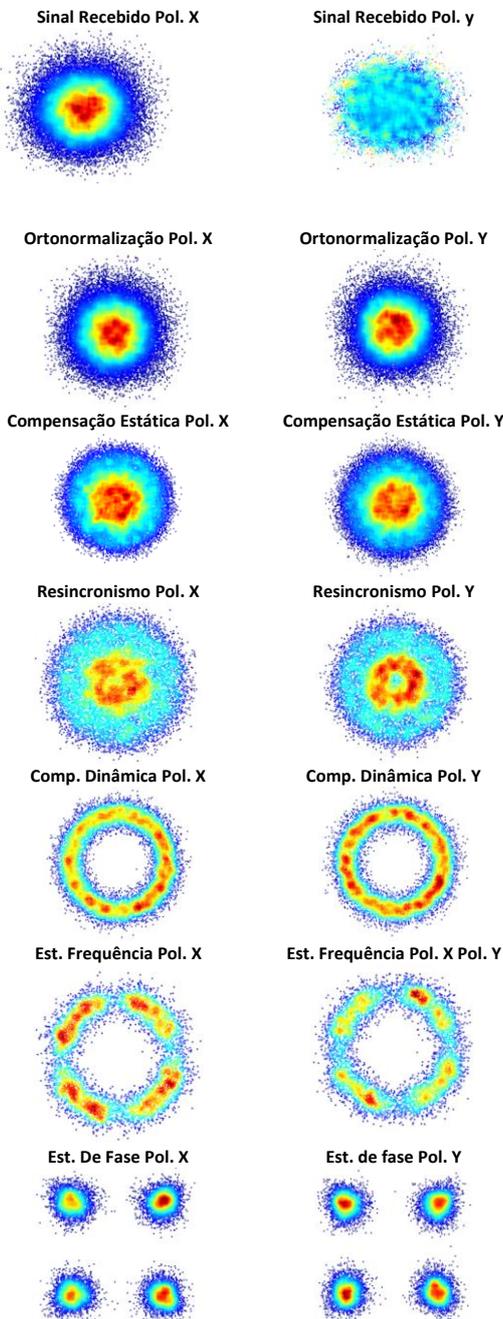


Fig. 3. Sequência de processamento digital de sinais aplicado a 32 x 112 Gb/s NRZ-DP-QPSK com alcance de 1125 km.

O resultado ilustrado na Figura 3 é relativo ao tratamento do sinal recebido de uma transmissão óptica WDM com 32 x 112 Gb/s DP-QPSK após cinco voltas no anel de recirculação (1125 km), que resulta em uma BER de $1,4 \cdot 10^{-6}$ após o processamento digital de sinais.

Pode-se verificar que as constelações para ambas as polarizações do sinal recebido após os 1125 km se encontram completamente penalizadas, recuperadas por meio do processamento de sinais realizados *off-line* exibindo, no fim do processo, uma constelação QPSK em cada polarização.

IV. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais obtidos. A Figura 4 ilustra a taxa de erro de bit (Fig.4a), e a OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*) (Fig.4b) em função do número de voltas. É verificado um alcance máximo de 4050 km para a situação em que nenhum filtro é utilizado no anel de recirculação, desempenho semelhante ao observado quando é utilizado um filtro óptico de 100 GHz. Este resultado é justificado pela largura do filtro óptico resultante após várias voltas no anel de recirculação, cuja largura é maior que a banda óptica ocupada pelo sinal óptico modulado 112 Gb/s NRZ-DP-QPSK, o que possibilita o acomodamento do sinal óptico modulado se perda de componentes espectrais do sinal. Na situação em que um filtro óptico de 50 GHz de largura de banda é utilizado no anel de recirculação, o alcance máximo do sistema é 3600 km, limitação imposta pelo efeito da filtragem. Até 2500 km (11 volta no anel de recirculação) os desempenhos dos sistemas são idênticos (sem filtro, filtro de 100 GHz e filtro de 50 GHz), pois o filtro resultante em todos os casos, exceto para o sem filtro, não possui banda óptica suficiente baixa para eliminar as componentes principais do sinal óptico modulado.

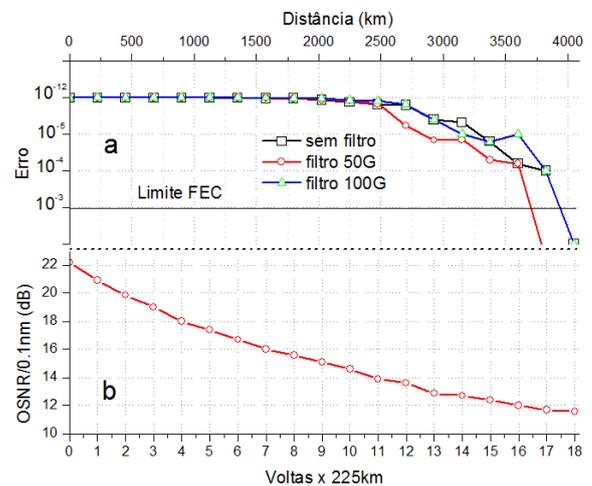
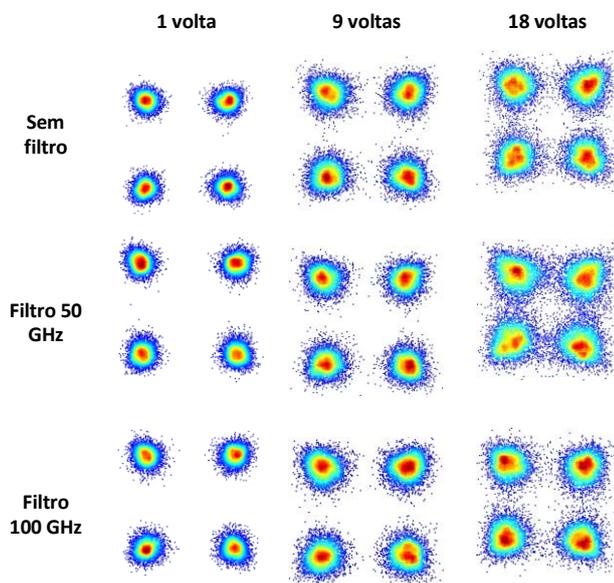


Fig. 4. (a) Taxa de erro de bit (BER) e (b) OSNR em função do número de voltas no anel de recirculação para três sistemas analisados (sem filtro, com filtro de 50 GHz e filtro de 100 GHz).

A Tabela 1 apresenta as constelações obtidas para cada configuração analisada, permitindo a visualização da degradação ao longo da distância percorrida pelo sinal. Analisando a Tabela 1 e de acordo com os resultados ilustrados na Figura 4, pode-se verificar que o aumento do número de voltas causa um significativo impacto na constelação resultante. Neste experimento, esta degradação é atribuída majoritariamente pela inserção de ruído dos amplificadores ópticos que degradam a OSNR do sinal óptico. A análise da Figura 4 apresenta uma penalidade mais acentuada para o sistema que utiliza ROADMs com grade de 50 GHz. Um melhor desempenho qualitativo é obtido ao utilizar filtro de 100 GHz, caso seja comparado à filtragem em 50 GHz, porém resultados semelhantes para os casos sem filtragem e com filtragem de 100 GHz são obtidos, como esperado pela a análise qualitativa apresentada na Figura 4.

TABELA 1: CONSTELAÇÕES RESULTANTES DA ANÁLISE DE FILTRAGEM NA TRANSMISSÃO 32 x 112G NRZ-DP-QPSK COERENTE.



Com o intuito de analisar mais detalhadamente os efeitos da filtragem óptica ao longo da propagação, o efeito do aumento do número de filtragens realizadas no sinal óptico foi analisado, utilizando um sinal de emissão espontânea amplificada (ASE) de um EDFA. A Figura 5 apresenta os resultados obtidos quando ROADMs WSS são utilizados como filtros ópticos, configurados para operar na grade de 50 GHz (Figura 5.a) e na grade de 100 GHz (Figura 5.b).

Verifica-se que ambos os casos (Figura 5.a e Figura 5.b) apresentam um comportamento semelhante, em que a largura espectral é sensivelmente reduzida nas cinco primeiras voltas. Após a quinta volta, a taxa de variação da largura espectral do sinal é reduzida em função do número de voltas, porém em contínuo decréscimo.

O comportamento ilustrado na Figura 5 confirma o desempenho verificado na transmissão dos 32 canais modulados a 112G NRZ-DP-QPSK, resultados ilustrados na

Figura 4. É observado que o consumo de banda é o mesmo independente da banda do filtro, neste caso para 5 voltas foi de 12,5 GHz (0,1 nm), sendo assim, é compreensível que o canal modulado a 112G que ocupa 56 GHz espectralmente seja bem mais penalizado quando transmitido na grade de 50 GHz que na de 100 GHz. Para o ROADM com filtragem em 50 GHz a utilização em série do filtro no anel de recirculação impõem uma redução de banda a 3 dB, após 5 filtragens, que resulta em uma filtragem de 37,5 GHz. A redução de banda a 10 dB resulta em uma filtragem de 33,75 GHz exibindo uma diminuição de 16,25 GHz. Para o ROADM operando em 100 GHz resultados semelhantes são verificados, porém a redução espectral verificada até 30 voltas não chega a eliminar componentes espectrais do sinal.

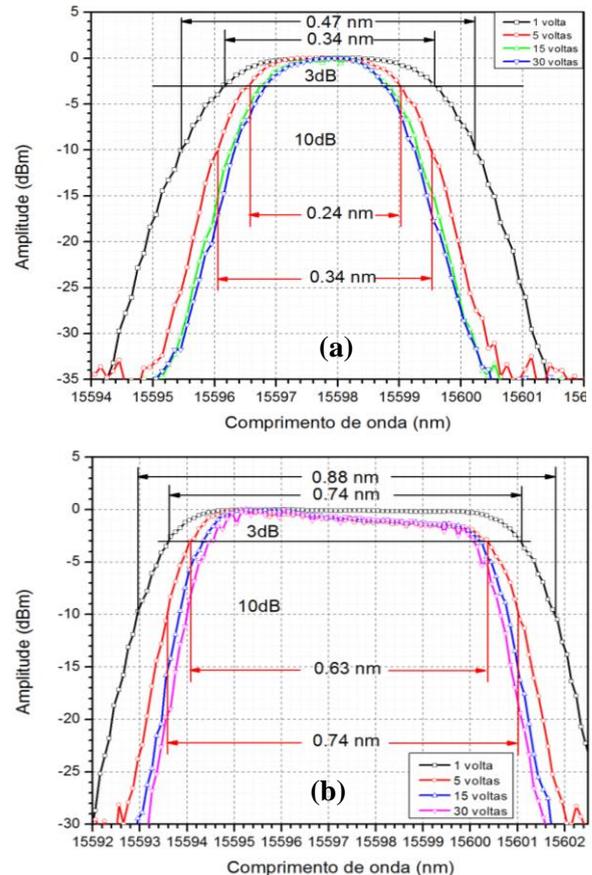


Fig. 5. Representação do impacto da filtragem gerada pelo WSS para 1, 5, 15 e 30 voltas no anel de recirculação com filtro de largura óptica de (a) 50 GHz e (b) 100 GHz.

A Figura 6 ilustra espectros ópticos resultantes da propagação após 9 voltas (2025 km) de 32 canais modulados a 112 Gb/s NRZ-DP-QPSK nas três configurações realizadas (sem filtragem, ROADM 50 GHz e ROADM 100 GHz).

A partir da análise da Figura 6, é possível verificar que, por meio dos níveis de potência e OSNR dos canais, os perfis espectrais para o sistema sem filtragem e com filtragem de 100 GHz são semelhantes, exceto para o canal filtrado antes da recepção. Para o espectro de 50 GHz (Figura 6.b) é verificado que a filtragem óptica mais estreita não apenas se apresenta como um fator negativo, podendo ser benéfica devido à

minimização do ruído ASE nos canais adjacentes elevando a relação sinal ruído óptica e a potência dos canais recebidos. Porém, este ganho introduzido pela filtragem em 50 GHz é inferior à penalidade inserida pelo consumo de componentes espectrais, tornando o sistema mais penalizado que na grade de 100 GHz ou com ausência de filtragem.

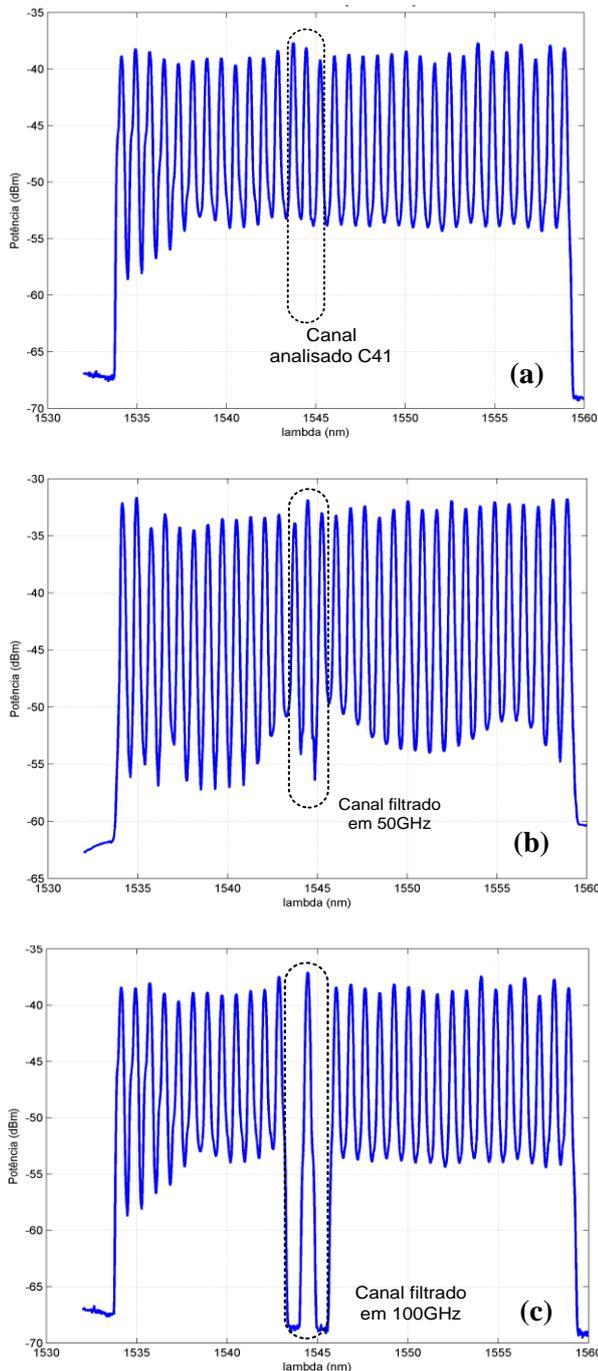


Figura 6: Fig. 6. Espectro recebido após a transmissão de 32 x 112 Gb/s NRZ-DP-QPSK por 2025 km (9 voltas) com (a) ausência de ROADMs, (b) ROADMs com filtro de 50 GHz e (c) ROADMs com filtro de 100GHz.

V. CONCLUSÕES

É apresentada a primeira demonstração experimental na América Latina de um sistema óptico WDM 32 x 112 Gb/s NRZ-DP-QPSK. Um alcance máximo de 4050 km é obtido, sendo apresentadas estruturas de transmissão, propagação, recepção, assim como os algoritmos de filtragem digital realizados no tratamento *off-line*. São também analisados os efeitos da filtragem óptica imposta pelos ROADMs em redes ópticas com alta eficiência espectral, sendo quantificados os efeitos da filtragem óptica para sinais a 112 Gb/s NRZ-DP-QPSK transmitidos na grade de 50 GHz e 100 GHz. Este trabalho experimental é parte de um programa de comunicações ópticas de alta velocidade, em que estruturas de transmissão, recepção e propagação estão em desenvolvimento com o intuito de ampliar o alcance e a capacidade dos sistemas ópticos de nova geração.

AGRADECIMENTOS

Ao FUNTTEL no âmbito do projeto PAR100GETH e ao CPqD pelo financiamento e apoio.

REFERENCES

- [1] - Renaudier, J., Bertran-Pardo, O., Charlet, G., Salsi, M., Mardoyan, H., Tran, P. e Bigo, S., "8 Tb/s long haul transmission over low dispersion fibers using 100 Gb/s PDM-QPSK," Bell Labs Technical Journal 14(4), 27–46 (2010).
- [2] - A. Nag, M. Tornatore, e B. Mukherjee, "Optical Network Design with Mixed Line Rates and Multiple Modulation Formats", IEEE/OSA J. of Lightwave Technology, V. 28, N. 4, pp.466 – 475, 2010.
- [3] - Chandrasekhar, S. and Liu, X., "40 Gb/s DBPSK and DQPSK formats for transparent 50 GHz DWDM transmission," Bell Labs Technical Journal 14(4), 11–26 (2010).
- [4] - S.J. Savory, "Digital Coherent Optical Receivers: Algorithms and Subsystems," Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of, vol.16, no.5, pp.1164-1179, Sept.-Oct. 2010.
- [5] - Chang, F., Onohara, K. e Mizuochi, T., "Forward Error Correction for 100 G Transport Networks," IEEE Communications Magazine, pp. 48–55 (2010).
- [6] - S. Haykin, Adaptive Filter Theory, 4th Ed., Prentice Hall, 2001.
- [7] - S. J. Savory, "Digital filters for coherent optical receivers," Opt. Express 16, 804-817 (2008).
- [8] - F. Gardner, "A BPSK/QPSK timing-error detector for sampled receivers," IEEE Trans. Commun., vol. COM-34, no. 5, pp. 423–429, May 1986.
- [9] - Z. Li et al., "Wide-Range and Fast-Convergence Frequency Offset Estimator by BER-Aiding..." OSA/ACP 2009, ThT2, (2009).
- [10] - El-Darawy, M.; Pfau, T.; Hoffmann, S.; Noe, R., "Differential phase compensated constant modulus algorithm for phase noise tolerant coherent optical transmission," Summer Topical Meeting, 2009. LEOSST '09. IEEE/LEOS, vol., no., pp.95-96, 20-22 July 2009.