

Caracterização de Amplificadores Ópticos para Aplicações DWDM

Mônica L. Rocha, Claudio Florida, Julio C. R. F. de Oliveira, Fabio D. Simões, Miriam R. X. Barros, Mario T. Furtado, Sandro M. Rossi e João B. Rosolem

Resumo — Usando a técnica de subtração do ruído da fonte, medimos o ganho e a figura de ruído de amplificadores ópticos operando na banda C. Duas configurações são investigadas: monocal (laser cavidade externa sintonizável) e multicanal (16 lasers DFB espaçados em 200 GHz). No sistema monocal, o efeito do ruído da fonte é avaliado e o erro de sua supressão no cálculo da figura de ruído é estimado. Para aplicações DWDM, a variação do ganho em função da potência de entrada é medida na caracterização multicanal, e comparada com a caracterização monocal. Demonstramos que, dependendo do regime de saturação do amplificador, em operação DWDM, a resposta espectral do ganho perde em planicidade e a imprecisão na medida da figura de ruído cresce. O impacto destes erros é significativo nos processos de equalização de canais, nas simulações numéricas e no desempenho sistêmico.

Palavras-Chave—Caracterização de amplificador óptico; ganho; figura de ruído; multiplexação por divisão de comprimento de onda.

Abstract — We use a source noise subtraction technique for measuring gain and noise figure of C-Band erbium-doped fiber amplifiers (EDFA), in a single-channel and in a multi-channel (16 channel) environment. In the single-channel configuration, the influence of the source noise level in calculating the noise figure is investigated by comparing two equivalent characterizations, for the source noise being taken into account in just one of them. In the multi-channel setup, applied to a DWDM EDFA with gain flattening filter, we evaluate the effect of input power variation on the gain tilt and the impact it causes on the values of gain and noise figure. We demonstrate that, depending on the saturation level, the DWDM amplifier may lose its gain spectral flatness and the noise figure value may be imprecisely estimated. The implications of those errors on channel equalization processes, numerical simulations and system performance may be severe.

Keywords— Optical amplifier characterization; gain; noise figure; wavelength division multiplexing.

I. INTRODUÇÃO

Amplificadores ópticos são usados extensivamente em sistemas WDM densos (DWDM) para simultaneamente prover ganho a dezenas de comprimentos de onda pouco espaçados espectralmente (tipicamente, múltiplos de 100 GHz), e expandir a capacidade de enlaces ópticos. Infelizmente, além do ganho (G), os amplificadores adicionam aos sinais flutuações indesejáveis de potência que podem penalizar

seriamente o desempenho sistêmico. Os efeitos deste ruído podem ser quantificados através da figura de ruído (*Noise Figure*, ou NF), um parâmetro fundamental que permite a avaliação do comportamento do ruído de amplificadores individuais e o projeto de sistemas com amplificadores em cascata. Embora a formulação original da figura de ruído tenha sido proposta por Friis há décadas [1], a literatura recente ainda reporta um intenso debate em torno da definição precisa do ruído e da figura de ruído de amplificadores ópticos [2]-[8].

De maneira similar, uma variedade de técnicas de caracterização do ganho e figura de ruído são propostas, destacando-se a realizada no domínio do tempo: Extinção no domínio do tempo, (*Time Domain Extinction, TDE*), e as no domínio da frequência: (Subtração da Fonte, Extinção da Polarização, Redução da Fonte e Substituição do Sinal) [6], [9]-[11]. Em sua forma mais simples, a caracterização da figura de ruído deve ser consistente com as definições estabelecidas pelo *International Electrotechnical Commission, IEC*, adotada pelo *ITU-T* e em uso pela maioria dos fabricantes de amplificadores ópticos e instrumentos de teste [11]. Tendo como base a relação sinal-ruído, SNR, determinada em termos dos níveis do sinal e ruído na fotocorrente de um fotodetector colocado no caminho óptico, a figura de ruído permite que os projetistas de sistemas e subsistemas avaliem o impacto do ruído sobre um sinal óptico.

Os dados obtidos através de caracterizações experimentais precisas dos parâmetros NF e G de um amplificador óptico viabilizam o uso de simuladores numéricos no projeto, testes e implantação de sistemas e subsistemas ópticos. A escolha do método mais adequado à aplicação sistêmica é essencial para a validade dos resultados da simulação, o que justifica uma avaliação do erro ao qual algumas simplificações ou aproximações de medida possam induzir. Em particular, tal abordagem “caracterização-simulação” pode ser aplicada diretamente a vários subprojetos da Coordenação Temática de Redes Ópticas do Projeto GIGA - um laboratório de campo que visa fomentar o desenvolvimento e a demonstração de novas tecnologias, técnicas, produtos e serviços para redes ópticas do tipo IP/WDM [12]. Os subprojetos de P&D estão sendo desenvolvidos através de parcerias entre o CPqD, universidades e outros centros de pesquisa, muitos dos quais focalizam o estudo de diferentes técnicas de amplificação óptica para permitir uma expansão da capacidade de operação da rede tronco, dos atuais 8 canais GbE (Gigabit Ethernet), para 16 canais a 10 Gb/s. As soluções e tecnologias desenvolvidas serão transferidas para indústrias após testadas nos laboratórios de pesquisa e validadas nos laboratórios do CPqD e na própria Rede Experimental de Alta Velocidade.

M. L. Rocha, C. Florida, J. C. R. F. de Oliveira, F. D. Simões, M. R. X. Barros, S. M. Rossi e J. B. Rosolem, Diretoria de Redes de Telecomunicações; M. T. Furtado, Diretoria de Gestão da Inovação, Fundação CPqD, Campinas, Brasil. Emails: {monica; t_cf00; julioc; fsmoes; mbarros; furtado; sandro; rosolem} @cpqd.com.br.

Este trabalho é parte do Projeto GIGA, financiado pelos Ministérios das Comunicações e da Ciência & Tecnologia, através do FUNTTEL-FINEP.

Neste artigo discutimos os resultados da medida de ganho e figura de ruído em duas montagens para caracterização de amplificadores ópticos: empregando uma única fonte (laser de cavidade externa sintonizável) ou vários canais (16 lasers DFB na banda C, espaçados em 200 GHz). O artigo se organiza da seguinte maneira: a seção II descreve o estudo monocanal, que avalia o erro causado pela supressão do ruído do sinal, na entrada do amplificador, no cálculo de NF. A seção III apresenta o estudo multicanal, que avalia o efeito da variação do ganho e da figura de ruído para aplicação em sistemas DWDM e a seção IV conclui o trabalho.

II. FIGURA DE RUÍDO

A figura de ruído de um amplificador óptico é uma medida da degradação da relação sinal/ruído do sinal, ao passar pelo amplificador. Seus principais agentes são os efeitos de emissão espontânea amplificada (Amplified Spontaneous Emission, ASE), gerada dentro do amplificador, e a conversão do ruído de fase em ruído de intensidade, devida a reflexões ópticas internas. A figura de ruído, dada em unidades lineares, é definida como sendo a relação sinal/ruído na entrada dividida pela relação sinal/ruído na saída do amplificador, ou seja:

$$NF = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \quad (1)$$

Assumindo que, na entrada, o sinal é limitado pelo ruído balístico e que, na saída, o ruído tem contribuições dos batimentos entre sinal e emissão espontânea e batimento entre os diversos componentes da emissão espontânea, obtemos a seguinte expressão para a figura de ruído [4]:

$$NF = \frac{P_{Nout}}{h\nu\Delta\nu G} + \frac{1}{G} \quad (2)$$

onde P_{Nout} é a potência da emissão espontânea amplificada (ASE) na saída do amplificador no comprimento de onda do sinal, medida na largura de banda $\Delta\nu$, h é a constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34}$ J.s), ν é a frequência óptica, dada em Hz ($\nu = c/\lambda$), $\Delta\nu$ é a largura de banda óptica em Hz ($\Delta\nu = c \cdot \Delta\lambda/\lambda^2$) e G é o ganho do amplificador em unidades lineares.

Como a Eq. (2) considera que o sinal na entrada é limitado por ruído balístico, o valor calculado da figura de ruído apresenta um erro, por não levar em consideração o ruído não Poissoniano na entrada. Para levar em consideração o ruído total do sinal na entrada do amplificador, deve-se subtrair da potência de ASE a potência de ruído da fonte (*Source Spontaneous Emission, SSE*), ou P_{Nin} , que é amplificado ao passar pelo amplificador. Assim, a expressão ficaria [4]:

$$NF = \frac{P_{Nout} - GP_{Nin}}{h\nu\Delta\nu G} + \frac{1}{G} \quad (3)$$

ou seja,

$$NF = \frac{P_{Nout}}{h\nu\Delta\nu G} - \frac{P_{Nin}}{h\nu\Delta\nu} + \frac{1}{G} \quad (4)$$

Observa-se que o erro no cálculo da figura de ruído depende essencialmente do nível de ruído do sinal na entrada. Por exemplo, uma fonte com nível de emissão espontânea de -50 dBm/nm causa a um erro de 0,5 dB na figura de ruído, se esta emissão espontânea não for considerada [8].

Realizamos um experimento para a medida da figura de ruído, baseado na interpolação espectral, em duas condições distintas. Na primeira, levamos em consideração o ruído da fonte de sinal e na segunda, desconsideramos este ruído. A montagem experimental usada para a realização destas medidas é apresentada na Fig. 1. A fonte de sinal usada é um laser sintonizável de cavidade externa. O nível do sinal na entrada do amplificador é variado usando-se um atenuador variável. Os níveis de sinal e de ruído são medidos na entrada e na saída do amplificador, usando-se um mesmo analisador de espectro óptico.

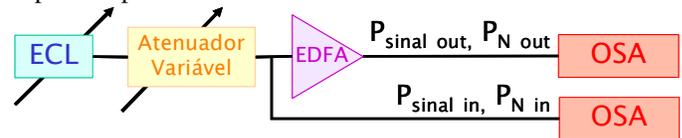


Fig. 1. Montagem experimental usada para a realização da medida de ganho e figura de ruído do amplificador óptico. (ECL = External Cavity Laser)

No método de interpolação espectral, a emissão espontânea da fonte é determinada a partir da média de dois ou mais pontos de seu nível, medidos a um *offset* previamente especificado (~ 1 nm) acima e abaixo do comprimento de onda do sinal. Verificamos a eficácia de usarmos um laser de cavidade externa na caracterização do amplificador, uma vez que a maioria dos sistemas amplificados emprega lasers DFB. Para isso, comparamos o nível de emissão espontânea destas duas fontes, ajustadas para mesmos valores de frequência e potência de emissão. O resultado, visto na Fig. 2, mostra que os níveis de sinal e SSE para um dos lasers DFB e os do laser de cavidade externa sintonizável usado são aproximadamente iguais, dentro de janela de aproximadamente ± 1 nm.

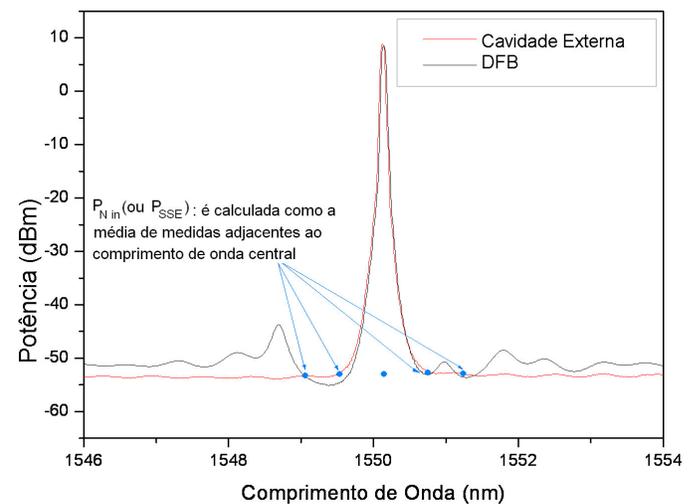


Fig. 2. Espectros de emissão de um laser DFB e de um laser de cavidade externa, ambos igualmente ajustados em frequência e potência

Os resultados obtidos nas caracterizações monocanal são apresentados nas Figs. 3 e 4. A Fig. 3 mostra as curvas de ganho e as de figura de ruído, considerando-se ou não o nível

de ruído do sinal na entrada de um típico amplificador a fibra dopada com érbio, EDFA, quando variamos a potência na sua entrada. Para esta medida, o comprimento de onda foi mantido em 1550 nm. Observamos que a máxima diferença entre as figuras de ruído obtidas usando as Eqs. (2) e (4) é de 1,6 dB e é obtida para a máxima potência na entrada. Para valores mais baixos de potência, a diferença é menor, tornando-se desprezível para potências de entrada inferiores a -12 dBm.

Realizamos medidas em função do comprimento de onda do sinal na entrada do amplificador, para estimar a dependência do nível de ruído do laser em relação a este parâmetro. Os resultados são apresentados nas Figs. 4 e 5, para duas potências de entrada de -11,5 dBm e -1,5 dBm. Observa-se que a diferença entre os valores de figura de ruído calculados por (2) e (4) não varia ao longo da faixa espectral de funcionamento do amplificador, isto é, entre 1530 e 1560 nm, indicando, mais uma vez que não há necessidade de considerar o ruído da fonte de sinal ao longo de toda a faixa, na condição de sinais fracos na entrada do amplificador.

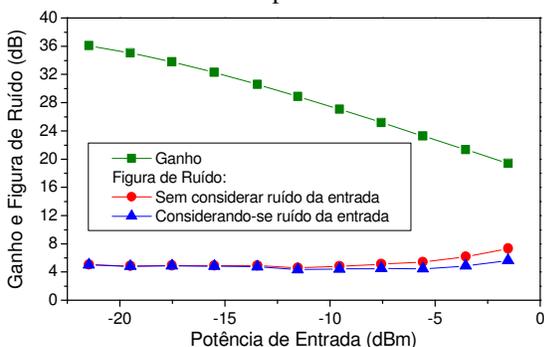


Fig. 3. Ganho e figura de ruído em função da potência de entrada do sinal para $\lambda_s = 1550$ nm e $\Delta\lambda = 0,5$ nm.

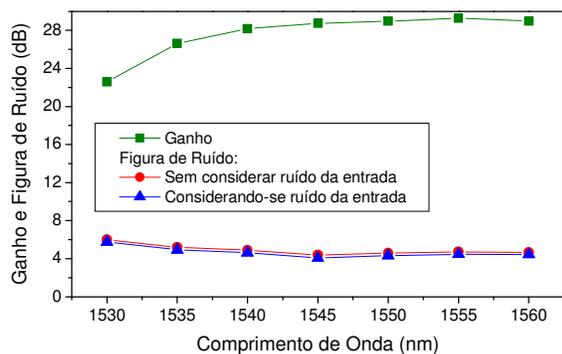


Fig. 4. Ganho e figura de ruído em função do comprimento de onda do sinal para $P_{in} = -11,5$ dBm e $\Delta\lambda = 0,5$ nm.

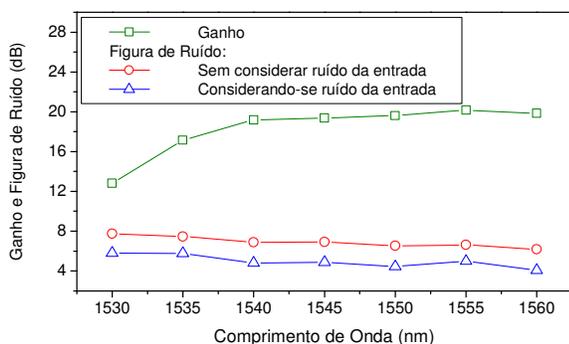


Fig. 5. Ganho e figura de ruído em função do comprimento de onda do sinal para $P_{in} = -1,5$ dBm e $\Delta\lambda = 0,5$ nm.

O erro resultante da medida da figura de ruído, quando se despreza o ruído na entrada do amplificador, está mostrado na Fig. 6, em função do ruído da fonte, dado em dBm/nm. Este gráfico está em bom acordo com o resultado obtido por D. M. Baney [9], e mostra que o erro na estimativa da figura de ruído está abaixo de 1,6 dB para fonte com nível de ruído menor do que -45 dBm/nm, que é o caso do laser sintonizável utilizado em nossas caracterizações.

Uma dúvida freqüente é sobre o comportamento, observado para laser de cavidade externa, ser válido para lasers DFB, que são mais comumente usados nos sistemas de transmissão. Uma medida realizada com laser DFB em 1545 nm por Habbab e colaboradores [10], resultou em respostas semelhantes às que obtivemos, ou seja, a diferença entre as duas formas de calcular a figura de ruído é significativa apenas para altas potências de sinal na entrada. Assim, também para lasers DFB há necessidade de se considerar o ruído da fonte de sinal apenas para altas potências na entrada.

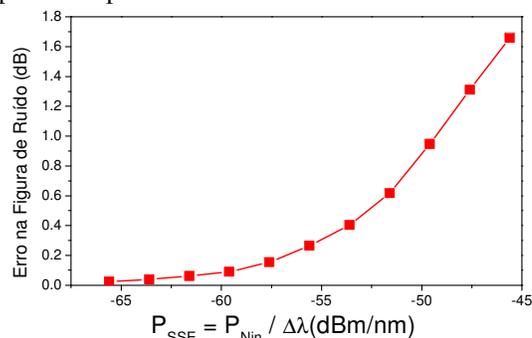


Fig. 6. Erro no cálculo da figura de ruído em função do nível de ruído da fonte, medido no comprimento de onda de 1550 nm.

III. CARACTERIZAÇÃO MULTICANAL

A montagem usada na caracterização multicanal de um EDFA é apresentada na Fig. 7. Como indicado, 32 lasers DFB são combinados, em oito feixes de canais pares e ímpares, através de 4 MUXes (espaçamento 200 GHz), cujas saídas são combinadas em dois *interleavers* (200 : 100 GHz) cujas saídas se somam em um acoplador 2 : 1, resultando no feixe final, na banda C. Espectros de 32 e 16 canais, na saída do acoplador, são mostrados na Fig. 7, bem como o de 16 canais, na saída do EDFA. Para uma medida mais precisa da figura de ruído, optamos por desabilitar 16 canais pares, de modo a aumentar o espaçamento entre eles (200 GHz) e assim reduzir o erro na determinação, por interpolação espectral, do nível de ruído dos sinais na saída do amplificador. O uso dos MUXes possui a vantagem da flexibilidade em seleção espectral e menores perdas, tanto por inserção e quanto por dependência da polarização. Além de prover maior nível de sinal na entrada do amplificador sob teste, eles filtram a emissão espontânea das fontes laser, o que também poderia influenciar a precisão das medidas. Nessa configuração, o SSE de cada laser é reduzido. A sintonia e potência dos lasers são controladas automática e individualmente, de forma a otimizar sua emissão espectral na banda dos MUXes, bem como a manter a equalização de potência do feixe DWDM. A resposta plana do atenuador variável, na entrada do EDFA, permite que os níveis de potência dos canais sejam variados igualmente.

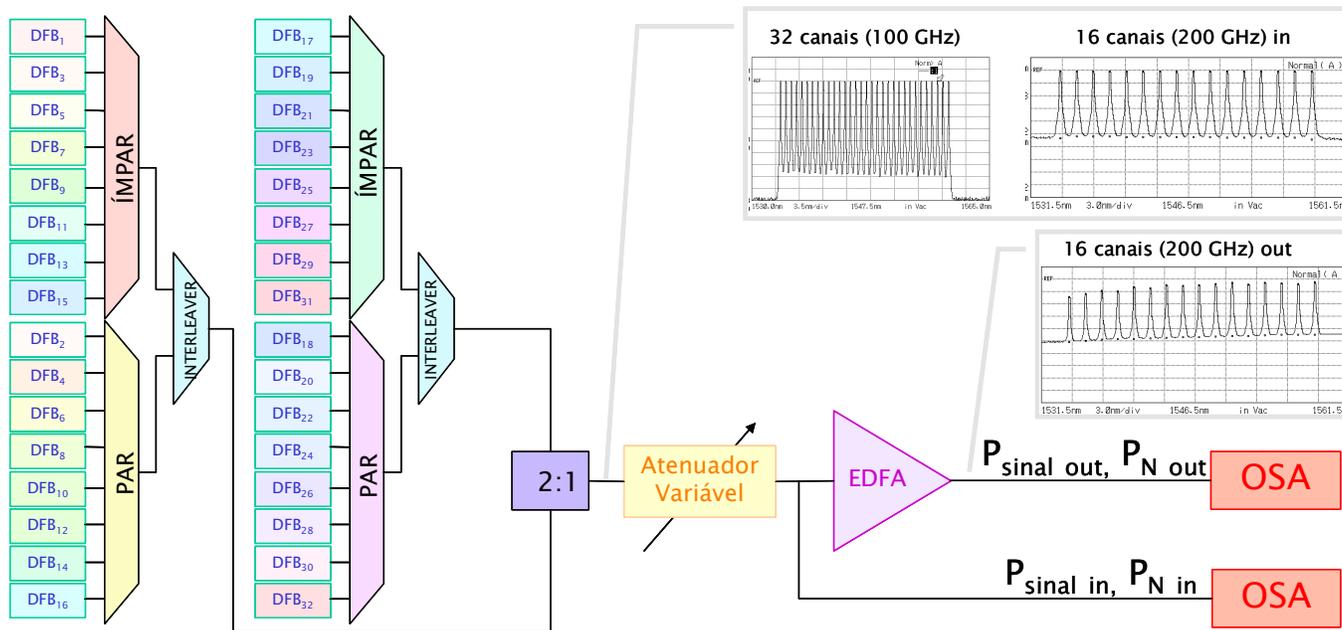


Fig. 7. Montagem básica para caracterização do ganho de um amplificador óptico, a partir de um feixe de 32 canais ópticos (espaçamento de 100 GHz), mostrado na saída do acoplador 2:1. O feixe de 16 canais (espaçamento de 200 GHz) permite uma medida mais precisa dos níveis de potência de ruído na entrada e saída do amplificador, necessários para a determinação da figura de ruído.

A medida de ganho é obtida lançando-se o feixe DWDM na entrada do amplificador, determinando-se o ganho de cada canal na saída. A figura de ruído é calculada pela Eq. (4), a partir do ganho e dos níveis de ruído do sinal na entrada e na saída do EDFA. As Fig. 8 e 9 mostram os resultados para potências de entrada entre 2 dBm e -22 dBm. O EDFA caracterizado possui um filtro aplainador de ganho com atenuação na região de 1535 nm.

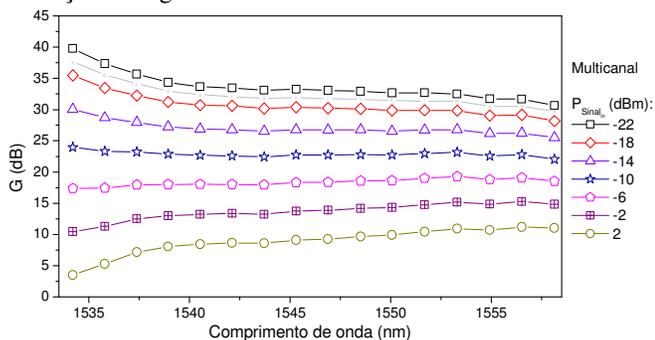


Fig. 8. Multicanal: ganho em função do comprimento de onda do sinal para P_{in} variando entre 2 e -22 dBm e $\Delta\lambda = 0,2$ nm.

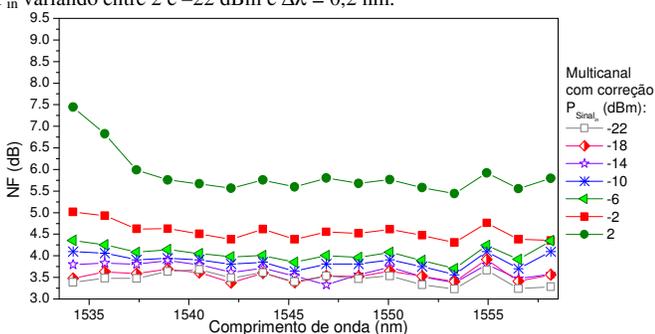


Fig. 9. Multicanal: figura de ruído em função do comprimento de onda do sinal para P_{in} variando entre 2 e -22 dBm e $\Delta\lambda = 0,2$ nm. A correção refere-se ao fato do cálculo de NF incluir a medida do ruído da fonte (P_{Nin}).

Para comparação, trocamos os DFBs pelo laser sintonizável, assumindo que a transição de amplificação do íon de érbio é homoganeamente espalhada e o sinal, ajustado em potência e frequência, estabelece uma inversão de população equivalente à causada pelo feixe DWDM [4]. As Fig. 10 e 11 mostram os resultados na mesma faixa de potência de entrada. O ruído da fonte na entrada do amplificador não foi medido, mas o valor de NF foi corrigido de acordo com o erro estimado na Fig. 6.

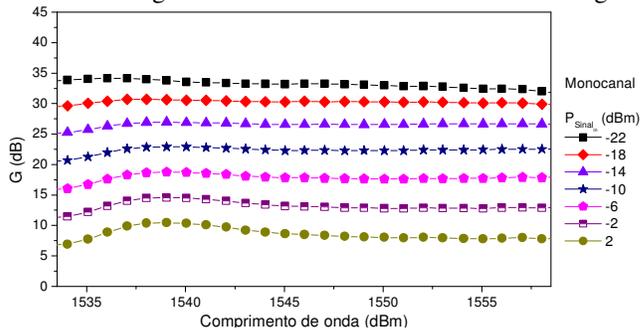


Fig. 10. Monocanal: ganho em função do comprimento de onda do sinal para P_{in} variando entre 2 e -22 dBm e $\Delta\lambda = 0,2$ nm.

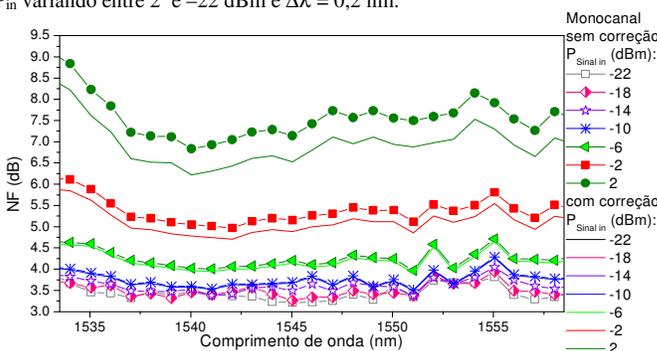


Fig. 11. Monocanal: figura de ruído em função do comprimento de onda do sinal para P_{in} variando entre 2 e -22 dBm e $\Delta\lambda = 0,2$ nm. A correção refere-se à inclusão, no cálculo de NF, do erro estimado na Fig. 6.

As curvas de ganho, Figs. 8 e 10 para caracterização multicanal e monocanal, respectivamente, indicam uma variação de ganho no primeiro caso (multicanal) que não é observada no segundo caso. Uma comparação mais detalhada destes resultados pode ser feita em termos do parâmetro conhecido como “*tilt* no ganho” em sistemas multicanais. Segundo a norma IEC 61291-4, o *tilt* no ganho é definido como a razão entre as mudanças no ganho, em cada canal, e a mudança no ganho de um canal de referência, quando as condições da potência de entrada variam, ou seja, para um canal j , temos:

$$G_{TILT j} = \frac{G_j^{(1)} - G_j^{(2)}}{G_r^{(1)} - G_r^{(2)}}, \quad (5)$$

onde $G_{TILT j}$ é o *tilt* de ganho no canal j , em relação ao canal de referência, r , e (1) e (2) representam as medidas de ganho em duas series de medidas de potência de entrada do canal. A Fig. 12 apresenta a variação de ganho, medido para o canal mais alto (1558,14 nm) em relação ao ganho do canal mais baixo (1534,2 nm), em função da potência total de entrada. O ganho varia em torno de ~ 0 dB (operação como amplificador de linha, potência de -5 dBm) de $+7,5$ dB (operação como *booster*, potência de ~ 2 dBm) e -9 dB (operação como pré-amplificador, potência de -22 dBm). Para comparação, a Fig. 12 mostra uma variação de ganho da ordem de 2 dB, para potências mais baixas e praticamente plana a partir de -10 dBm na entrada, quando a caracterização é feita na configuração monocanal, sugerindo que desconsiderar o *tilt* de ganho em sistemas (D)WDM pode levar a um erro de projeto relevante.

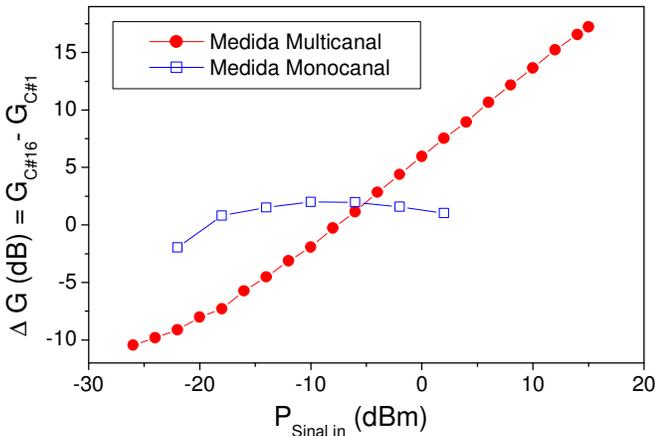


Fig. 12. Variação do ganho entre os canais extremos (C#16 em relação ao C#1, em função da potência total na entrada do amplificador.

O efeito desta simplificação na medida da figura de ruído pode ser avaliado comparando-se as curvas das Figs. 9 e 11. Mesmo considerando a correção devida à inclusão do termo do ruído do sinal na entrada do amplificador, a caracterização monocanal também pode induzir um erro significativo, conforme representado na Fig. 13, em função da potência de entrada. Para valores de mais baixa potência (-22 a -6 dBm) o erro fica abaixo de 1 dB, mas pode chegar a quase 3 dB à

medida em que o amplificador opera mais saturado. Neste caso, a ASE do amplificador praticamente corresponderá à SSE das fontes amplificadas.

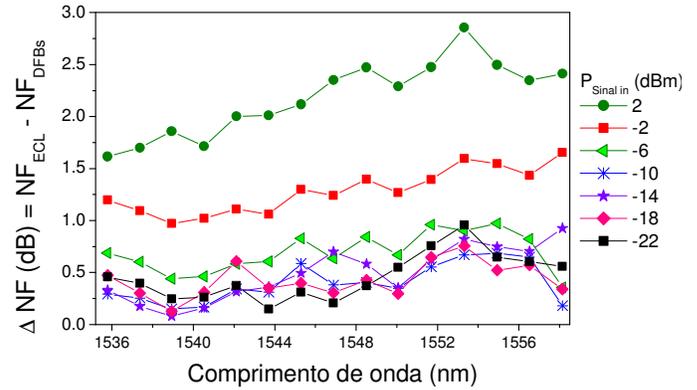


Fig. 13. Diferença entre as medidas da figura de ruído nas montagens monocanal (ECL = External Cavity Laser) e multicanal (DFBs), ambas considerando a emissão de ruído das fontes na entrada do amplificador.

IV. CONCLUSÃO

A precisão do sistema de caracterização de amplificadores a fibra dopada foi avaliada e discutida em termos do ruído de emissão espontânea da fonte, P_{SSE} , na entrada do amplificador (P_{Nin}) e do *tilt* de ganho, em duas configurações: fonte monocanal sintonizável (laser cavidade externa, ECL) e fonte multicanal (16 lasers DFB). As duas montagens são baseadas na técnica de subtração do ruído da fonte, realizada no domínio espectral. Os resultados demonstram a importância de se considerar o regime de saturação do amplificador e a condição de sua operação, i.e., sistema monocanal ou sistema DWDM, com forte impacto nos processos de equalização de canais, nas simulações numéricas e no desempenho sistêmico.

A montagem utilizando um só canal leva a uma boa estimativa qualitativa do comportamento dos mecanismos de emissão espontânea e estimulada na região espectral de interesse. Em sistemas monocanais, a medida com uma única fonte é razoavelmente precisa na caracterização de amplificadores operando como pré-amplificador e em linha, mesmo desconsiderando o valor do ruído de emissão espontânea da fonte. Em sistemas (D)WDM, sua precisão fica limitada a operação em linha, já que para outras configurações (*booster* e pré-amplificador) é recomendável que algumas mudanças sejam implementadas.

O cálculo exato da figura de ruído de um amplificador óptico requer a consideração do ruído da fonte. Entretanto, o erro por não se considerar o ruído da fonte é significativo apenas para altos valores de potência na entrada do amplificador, ou seja, para a condição de operação do amplificador de potência. A expressão normalmente usada para o cálculo da figura de ruído fornece um valor bastante preciso desta grandeza, para baixas potências de sinal na entrada, que é a condição de operação do pré-amplificador e do amplificador de linha, aplicações para as quais a figura de ruído é um parâmetro importante. Neste caso, o analisador de espectro óptico (OSA) usado na entrada do amplificador pode ser substituído por um medidor de potência óptica conectado

via *tap* de amostragem, mediante uma calibração para desconto da razão de acoplamento do *tap*. Alternativamente, (i) o programa de automação do sistema pode incorporar uma rotina de cálculo com *fittings* de medida da potência de *SSE* do laser, previamente computada; ou (ii) a montagem poderia incluir uma chave óptica 2 : 1 conectando o analisador de espectro óptico, OSA, alternadamente na entrada e na saída do amplificador, de modo a executar a técnica de interpolação espectral em ambas as portas.

Todos estes cuidados são necessários porque em sistemas DWDM, dependendo do regime de saturação do amplificador, mesmo que este seja projetado com alguma técnica para aplainamento de ganho, a resposta espectral do ganho pode perder em planicidade e a imprecisão na medida da figura de ruído pode crescer. O uso do laser de cavidade externa simplifica e agiliza as medidas, porém sua estimativa da variação de ganho entre os canais mais alto e mais baixo, em comparação à obtida através da caracterização empregando lasers DFB multiplexados, apresenta um erro na figura de ruído da ordem de até 0,5 dB, ~ 1 dB e 3 dB, para operação dos amplificadores em configuração de pré-amplificador, amplificador de linha e *booster*, respectivamente. É recomendável, portanto, que a montagem multicanal seja sempre usada quando o amplificador testado estiver sendo projetado para operação DWDM.

REFERÊNCIAS

- [1] H. T. Friis, "Noise figure of radio receivers", *Proc. IRE*, vol. 32, pp. 419 – 422, 1944.
- [2] H. A. Haus, "Noise Figure definition valid from RF to optical frequencies", *IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics*, v. 6, n. 2, pp. 240 – 247, 2000.
- [3] E. Desurvire, *Erbium-doped fiber amplifiers, principles and applications*, Wiley, NY, 1994.
- [4] P. C. Becker, N. A. Olsson, J. R. Simpson, *Erbium Doped Fiber Amplifiers – Fundamentals and Technology*, Academic Press (April 1999). Y. Yamamoto, K. Inoue, "Noise in amplifiers", *J. of Lightwave Technol.*, v. 21, n. 11, pp. 2895 – 2915, 2003.
- [5] H. A. Haus, "The noise figure of optical amplifiers", *IEEE Photonic Technol. Lett.*, v. 10, n. 11, pp. 1602 – 1604, 1998 – and H. A. Haus, "Corrections to "The noise figure of optical amplifiers"", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, v. 1, n. 1, pp. 143, 1999. - E. Desurvire, "Comments on "The noise figure of optical amplifiers"", *IEEE Photonics Technol. Letters*, v. 11, n. 5, pp. 620 – 621, 1999.
- [6] D. M. Baney, P. Gallion, and R.S. Tucker, "Theory and measurement techniques for the noise figure of optical amplifiers", *Optical Fiber Technology*, v. 6, pp. 122 – 154, 2000.
- [7] R. S. Tucker, D. M. Baney, "Optical noise figure: theory and measurements", in *Proceedings of Optical Fiber Conference*, paper W11, 2001.
- [8] D. M. Baney, "Gain and noise characterization of EDFAs for WDM applications", em *Proceedings of Optical Fiber Conference, OFC '97*, paper WA1, p9. 103, 1997)
- [9] S. Gupta and L. Qian, "Measuring gain and noise figure of erbium-doped fiber amplifiers using a broad-band source and a transmission filter", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, v. 16, n. 9, pp. 2030 – 2032, 2004.
- [10] I. Habbab, A. A. M. Saleh, N. J. Frigo, G. E. Bodeep, "Noise Reduction in Long Haul Lightwave All-Amplifier Systems", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 10, 9, 1281 (1992).
- [11] H. Okamura, "International Standardization of Optical Amplifiers", nos Anais da *Optical Amplifiers and Their Applications*, paper M3. OAA'99, OSA, 1999.
- [12] R.R. Scarabucci, A. Paradisi, M.R.X. de Barros, A.E. Reggiani, F.D. Simões, S.M. Rossi, J.B. Rosolem, M.R. Salvador, A.C. Sachs, T.R.T. Fudoli, J. Fanton, M.L. Rocha, R.F. da Silva, E. Mabilon, V. Corso, L. Pezzolo, E. Bastida, J.M.D. Mendes, A.M.O. Cabral, J.A. Matuso, M.C. Ide, R. Arradi, J.C. Said, J.C.R. Fernandes, M.R. Horiuchi, M.A.D. Santos, M.F. Oliveira, A.A. Juriollo, B.J.G. Aragão, G. Carvalho e M. Montoya, "Projeto GIGA e Rede Experimental de Alta Velocidade", *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações-Sbt'04*, 2004.