Caracterizador Automatizado de Máscara de Potência de Amplificadores Ópticos para Redes WDM Reconfiguráveis

Uiara C. Moura, Juliano R. F. Oliveira, Rafael L. Amgarten, Getúlio E. R. Paiva e Júlio C. R. F Oliveira

***Resumo*— Este artigo apresenta um projeto de caracterizador automatizado de amplificadores ópticos para redes WDM dinâmicas e diferentes condições de ganho. A caracterização é feita sob uma região no plano potência de entrada *versus* potência de saída denominada máscara de potência, que corresponde à região de operação do amplificador óptico. Tal região é definida pelos valores de potência mínima de entrada, potência máxima de saída e ganhos mínimo e máximo do amplificador. Como o número de pontos experimentais necessários para uma completa caracterização pode ser elevado em algumas situações, o procedimento manual se torna muito trabalhoso e demorado. Assim, para conhecer o desempenho dinâmico do amplificador óptico no que diz respeito ao comportamento de figura de ruído, planicidade espectral de ganho e precisão de controle de ganho dentro da máscara de potência, é proposta uma caracterização automatizada de amplificadores ópticos.**

***Palavras-Chave*— Caracterização de amplificadores ópticos, máscara de potência, figura de ruído, planicidade do espectro, precisão de controle de ganho.**

***Abstract*— This article presents a project of an optic amplifier automated characterizer for dynamic WDM networks and different gain condition. The characterization is made over a region of the input power *versus* output power plan, called power mask which corresponds to the operational region of the optical amplifier. This region is defined by the optical amplifier minimum input power, maximum output power, minimum and maximum gain values. As the necessary experimental points for a complete characterization may be high, the manual procedure become hard and longstanding. Thus, to obtain the dynamic performance of the amplifier by the behavior of noise figure, gain spectrum flatness and gain control accuracy inside the power mask, it is proposed an automated optical amplifier characterization.**

***Keywords*— Optical amplifier characterization, power mask, noise figure, spectrum flatness, gain control accuracy.**

I. Introdução

Um marco na evolução dos sistemas de transmissão em fibra óptica, o desenvolvimento do amplificador a fibra dopada com érbio (EDFA) permitiu a amplificação de vários comprimentos de onda simultaneamente, em torno de 1,55 μm, se tornando uma escolha atrativa para os sistemas WDM (*wavelength division multiplexing*) [1].

Porém, estes amplificadores possuem algumas imperfeições de desempenho que os projetistas de sistemas precisam levar em consideração ao utilizá-los. Uma delas é que ao mesmo tempo em que fornecem ganho, introduzem ruído. Além disso, não fornecem ganho plano sobre o espectro amplificado, fazendo com que canais experimentem diferentes ganhos ópticos. A planicidade do ganho se torna um fator crítico quando há amplificadores em cascata [2].

Para atender às demandas das novas aplicações dinâmicas, as redes ópticas WDM estão deixando de ser estáticas, operando com especificações bem definidas, para se tornar reconfiguráveis, onde tais especificações podem ser alteradas dinamicamente, de acordo com a demanda. Dessa forma, o sinal na entrada do amplificador óptico pode variar dependendo do número de canais no enlace óptico.

Além disso, o aumento na demanda por maior largura de banda e altas taxas de transmissão de dados têm impulsionado a utilização dos formatos avançados de modulação, que elevam a eficiência espectral dos canais. Porém, estes sinais são mais sensíveis à inserção de ruído, necessitando de uma relação sinal-ruído óptica (OSNR) maior na recepção. Assim, é necessário conhecer o desempenho dos amplificadores da rede e saber, a priori, qual o seu efeito sobre os sinais e, se possível, configurá-los para minimizar a inserção de ruído.

Como forma de conhecer o desempenho dos amplificadores ópticos, em [3] é apresentada uma plataforma automática para caracterização de amplificadores ópticos. Porém, a caracterização dinâmica é feita para dois carregamentos de canais e apenas um valor de ganho.

Neste trabalho, é apresentado o projeto de um caracterizador automatizado de amplificadores ópticos. Por meio desse caracterizador, é possível conhecer o desempenho do amplificador em termos da figura de ruído, planicidade espectral de ganho e precisão de controle de ganho para toda a faixa de operação do amplificador, que corresponde a uma região do plano potência de entrada *versus* potência de saída denominada máscara de potência [4]. A caracterização apresenta duas etapas: a etapa experimental por meio do Labview® e a etapa de tratamento de dados por meio do Matlab®.

O artigo é dividido da seguinte forma: na seção II é apresentado o princípio de funcionamento da tecnologia de amplificação óptica caracterizada neste trabalho. Na seção III é apresentado o projeto do caracterizador automatizado de amplificadores ópticos detalhando a montagem experimental e os programas utilizados para capturar e tratar os dados experimentais. Em seguida, na seção IV, os resultados experimentais são apresentados através das máscaras de potência para duas topologias de EDFA. Por fim, na seção V, as conclusões são apresentadas.

Uiara C. Moura, Juliano R. F. Oliveira, Rafael L. Amgarten, Getúlio E. R. Paiva e Júlio C. R. F Oliveira¸ Fundação CPqD, Campinas, Brasil, E-mails: umoura@cpqd.com.br, jrfo@cpqd.com.br, rluiz@cpqd.com.br, gpaiva@cpqd.com.br, julioc@cpqd.com.br. Este trabalho foi financiado pelo FUNTTEL.

II. Amplificadores e Máscara de Potência

Nos sistemas de comunicações ópticas, o sinal óptico sofre atenuação ao trafegar ao longo da fibra óptica e pelos dispositivos da rede. Essas perdas acumuladas diminuem a intensidade do sinal e o deixa com potência abaixo do limiar de detecção, tornando necessário sua regeneração por meio de amplificadores ópticos.

Apesar de apresentar vantagens sobre os regeneradores com conversores óptico-elétrico-óptico, como a possibilidade de amplificar vários comprimentos de onda simultaneamente e ser transparentes à taxa de transmissão e ao formato de modulação, o processo de amplificação óptica apresenta alguns problemas, como a introdução de ruído ao sinal amplificado (amplificadores EDFA), a sensibilidade à polarização do sinal (amplificadores semicondutores) e interferência entre canais WDM (amplificadores Raman) [2].

A. EDFA

Os amplificadores a fibra dopada com Érbio utilizam como meio de amplificação uma fibra dopada com átomos ionizados de érbio. Para uma melhor eficiência na transferência de energia entre o bombeio e o sinal, esta fibra óptica é bombeada por lasers de 980 ou 1480 nm, que foram largamente usados devido ao desenvolvimento do EDFA [1].

Sua aplicação abrange a banda C (1530 a 1560 nm), devido a emissão estimulada do EDFA nesta região [4]. Porém, o EDFA apresenta uma dependência de ganho com o comprimento de onda do sinal. Como consequência, diferentes canais WDM experimentam diferentes níveis de amplificação [2], tornando o espectro de saída não plano. O acúmulo desta inclinação ao longo de vários amplificadores em cascata é um fator crítico em sistemas ópticos.

Além disso, durante o processo de amplificação, também ocorre emissão espontânea. Os fótons provenientes dessa emissão são os principais componentes do ruído e também são amplificados (*amplified spontaneous emission* - ASE). Assim, na saída do amplificador, há uma combinação de sinal e ruído amplificado. O nível de ASE depende das potências de entrada e de bombeio, bem como do comprimento da fibra dopada utilizada. Seu impacto é quantificado por meio da figura de ruído (NF) do amplificador [1] que, consequentemente, também varia com esses parâmetros.

Em amplificadores EDFA de um estágio, há dificuldades de alcançar planicidade espectral de ganho e baixa figura de ruído simultaneamente. Por outro lado, amplificadores de dois ou três estágios podem prover planicidade espectral de ganho, mas não uma baixa figura de ruído.

B. Máscara de potência

Em uma rede dinâmica, é necessário que os amplificadores operem de forma satisfatória em uma faixa de potência de entrada que abrange vários carregamentos de canais, uma vez que este carregamento pode variar de forma dinâmica e imprevisível. Além disso, variações na potência de entrada também podem ser causadas por outros fatores, como uma variação no ganho do amplificador anterior.

Ademais, também é preciso que o amplificador opere em uma faixa de valores de ganho, permitindo, assim, que a variação da potência de entrada possa ser compensada pelo ajuste no ganho.

A região de operação do amplificador definida pela potência de entrada e ganho desejados, foi denominada como sendo a máscara de potência do amplificador [4]. Seu desempenho dinâmico é medido por meio dos valores de figura de ruído, planicidade do ganho e precisão de controle de ganho para cada ponto da máscara de potência.

A máscara de potência de um amplificador é ilustrada na Figura 1. A mesma pode ser definida em termos dos ganhos máximo e mínimo e das potências máxima de saída e mínima de entrada.

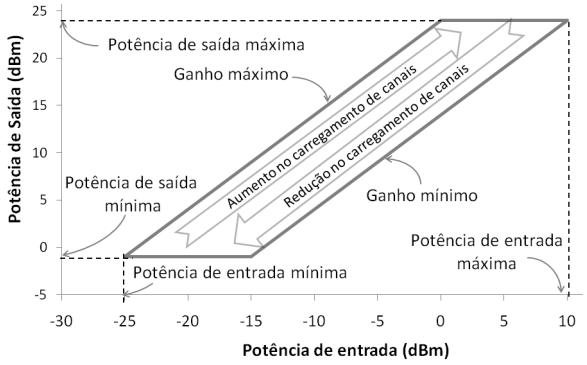


Fig. 1: Máscara de potência de amplificadores ópticos.

O desempenho do amplificador dentro da máscara raramente é conhecido previamente, mas pode ser obtido por meio de caracterização em laboratório, onde se varia a potência de entrada e/ou carregamento de canais para cada valor de ganho para obter os valores de potência na saída e calcular os parâmetros de figura de ruído, planicidade espectral de ganho e precisão de controle de ganho que descrevem o comportamento dinâmico do amplificador óptico.

Dessa forma, a máscara de potência pode ser utilizada nas redes dinâmicas para prever o desempenho do amplificador com a variação de carregamento de canais.

III. Caracterizador

O projeto do caracterizador automatizado de amplificadores surgiu da necessidade de caracterizar o amplificar óptico para obter seu desempenho dinâmico com relação aos parâmetros de figura de ruído, planicidade espectral de ganho e precisão de controle de ganho dentro da máscara de potência definida anteriormente.

A interface gráfica do caracterizador foi implementada por meio do software Labview®, responsável pelo envio de comandos e recebimento de dados de todos os dispositivos utilizados na caracterização.

Os dados colhidos experimentalmente são tratados por meio de um programa escrito no software Matlab®. Neste programa, são feitos os cálculos de figura de ruído, precisão de controle de ganho e planicidade espectral de ganho. Em seguida, gráficos das máscaras de potência com cada um desses parâmetros são geradas.

Como o número de pontos dentro da máscara de potência pode ser elevado, uma caracterização manual seria muito trabalhosa e demorada, inviabilizando a caracterização de vários amplificadores.

O processo de desenvolvimento do caracterizador automatizado foi dividido em duas etapas, descritas a seguir.

A. Etapa experimental

1) Montagem experimental: Para a montagem da bancada de testes foram utilizados os seguintes dispositivos:

- bancada com 40 canais WDM na grade padrão ITU-T estabilizada tanto em comprimento de onda como em potência;
- analisador de espectro óptico (OSA) que medirá os espectros de entrada e saída do amplificador sob caracterização;
- amplificador óptico auxiliar para garantir níveis de potência necessários ao longo da máscara;
- uma chave seletora de comprimento de onda de 40 canais com VOA (atenuador óptico variável) para equalizar o espectro na saída do amplificador auxiliar;
- atenuador óptico variável para que o nível de potência na entrada do amplificador a ser caracterizado seja ajustado com elevada precisão;
- acoplador óptico para dividir o sinal para o amplificador a ser testado e o OSA;
- chave óptica para selecionar o sinal a ser medido no OSA (potência de entrada ou de saída do amplificador).

A Figura 2 apresenta o esquemático da montagem experimental. A bancada de lasers fornece 40 canais DWDM na banda C (192,1 - 196 THz). Um amplificador auxiliar é utilizado para fornecer uma potência total máxima de 21,5 dBm. Em seguida, um WSS é utilizado para equalizar o sinal na saída do amplificador. Este procedimento é feito para que o sinal na entrada do amplificador caracterizado seja o mais plano possível, sendo possível estimar com maior precisão o quanto o mesmo afeta a planicidade no espectro de saída.

Em seguida, um atenuador variável fará o ajuste da potência total na entrada do sistema de amplificação ao longo da caracterização. Este sistema é composto por 100 km de fibra óptica padrão (SSMF G.652) e o amplificador sob caracterização. Uma amostra do sinal na saída do atenuador variável segue para a chave óptica. Na outra entrada desta chave está o sinal amplificado na saída do amplificador a ser caracterizado. Dessa forma, é possível medir ora a potência de entrada ora a potência de saída, de acordo com a posição da chave.

A comunicação destes equipamentos com o computador é feita através das interfaces GPIB, USB, Ethernet e serial, todas suportadas pelo software utilizado.

2) Desenvolvimento no Labview®: A Figura 3 apresenta o fluxograma do programa implementado no software Labview® para caracterização automatizada dos amplificadores ópticos.

O programa inicia com a entrada dos parâmetros que definem a região da máscara de potência: Ganhos mínimo e máximo, potência de entrada mínima e potência de saída máxima. O tamanho do passo (*Step*), em dB, também deve

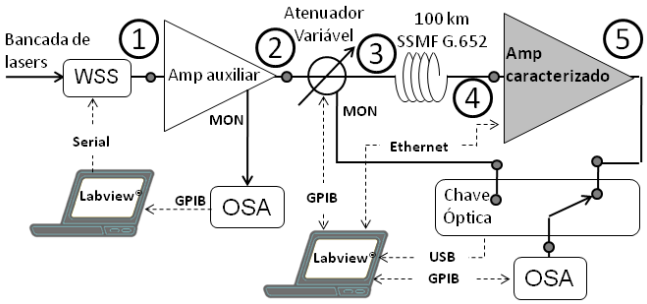


Fig. 2: Montagem experimental.

ser fornecido, definindo o passo da potência de entrada e ganho para determinar a quantidade de pontos de varredura da máscara.

Antes de iniciar a caracterização, o atenuador variável é ajustado para o seu valor mínimo, com a finalidade de descobrir a máxima potência possível na entrada do amplificador a ser caracterizado. Se esse valor for inferior a potência de entrada máxima da máscara, uma mensagem indicando este erro é apresentada e o programa termina sua execução.

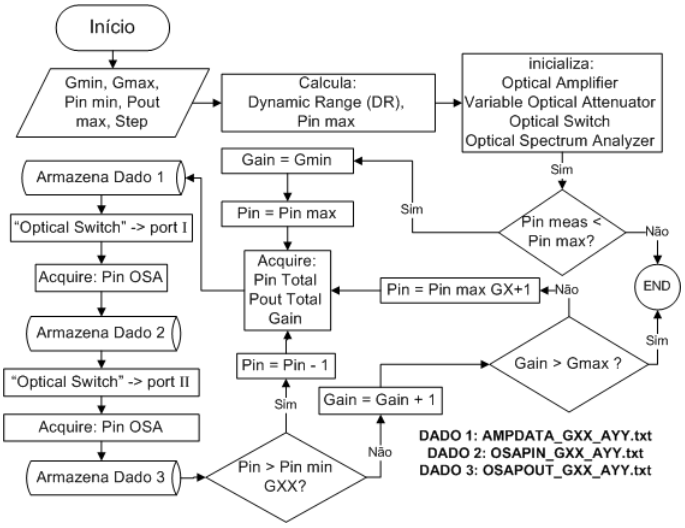


Fig. 3: Fluxograma do caracterizador de amplificadores.

Após esta verificação, o programa começa sua execução de caracterização ajustando o ganho para o seu valor mínimo. O atenuador é ajustado para fornecer a potência máxima na entrada do amplificador a ser caracterizado. Em seguida, os valores de potência total na entrada e saída, bem como o ganho configurado e medido são armazenados no aquivo AMPDATA_GXX_AYY.txt. No próximo passo, a chave óptica é ajustada de forma que o OSA capture o espectro na entrada e, logo em seguida, é ajustada novamente para que o espectro de saída seja obtido. Estes dados são salvos nos arquivos OSAPIN_GXX_AYY.txt e OSAPOUT_GXX_AYY.txt, respectivamente.

Para cada valor de ganho XX, o atenuador variável é ajustado várias vezes para fornecer os valores de potência de entrada. O valor YY indica o coeficiente do atenuador que começa do valor zero para a potência máxima de entrada para

o respectivo ganho.

Quando todas as potências de entrada foram ajustadas para um dado ganho, este é incrementado e o programa segue até que o valor do ganho ultrapasse o ganho máximo, que corresponde a uma das entradas dos parâmetros da máscara.

A Figura 4 apresenta a interface do caracterizador automatizado de amplificadores em redes WDM reconfiguráveis. Durante a caracterização, é possível visualizar os espectros de entrada e saída, bem como os valores de potência total de entrada e saída, atenuação e ganho configurados e ganho medido.

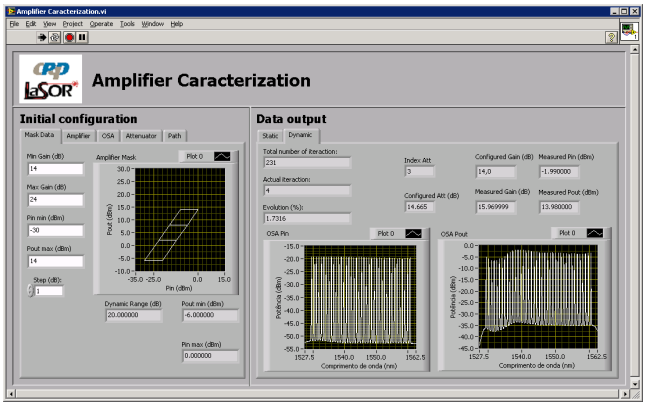


Fig. 4: Frontal do caracterizador.

Ao finalizar o programa, tem-se um conjunto de arquivos em formato texto para serem tratados e avaliados, como descrito na próxima seção.

B. Etapa de tratamento dos dados experimentais

Nesta etapa, os dados experimentais são tratados para obter os parâmetros de desempenho do amplificador. Este tratamento é feito por meio de uma rotina implementada no Matlab®, que lê os arquivos de dados experimentais armazenados durante a caracterização e faz os cálculos referentes à planicidade (*flatness*) espectral de ganho, figura de ruído (*noise figure*) e precisão de controle de ganho (*automatic gain control accuracy* - AGCacc) para cada ponto da máscara de potência.

A planicidade espectral de ganho é calculada por meio da diferença entre o canal com máxima potência de pico menos o canal com mínima potência de pico na saída do amplificador.

A figura de ruído entre os pontos 1 e 5, NF_{15}, e a figura de ruído do amplificador auxiliar (entre os pontos 1 e 2), NF_{12}, na Figura 2, são calculadas por meio da Equação 1 [5].

$$NF = \frac{Pase}{hvG\Delta v} + \frac{1}{G} \tag{1}$$

onde $Pase$ se refere a potência de ruído de ASE, h é a constante de Planck, v é a frequência do sinal, Δv é a largura de banda de medida do sinal, e G é o ganho entre os pontos de medida de NF.

Com os valores de NF_{15} e NF_{12} obtidos por meio da Equação 2 é possível obter a figura de ruído do amplificador sob caracterização, NF_{45}, a partir da Equação 2 que se refere à figura de ruído para amplificadores em cascata com perdas entre eles [5].

$$NF_{15} = NF_{12} + \frac{NF_{45}Att_{24}}{G_{12}} \tag{2}$$

onde Att_{24} corresponde à atenuação entre os pontos 2 e 4 e G_{12} se refere ao ganho do amplificador auxiliar.

A precisão de controle de ganho é a diferença entre os valores do ganho total configurado e ganho total medido.

IV. Resultados experimentais

Foram caracterizadas as duas topologias de EDFAs mais empregadas em amplificação de sistemas WDM compostas por um e dois estágios como forma de exemplificar a utilização do caracterizador. O segundo opera em modo de controle de ganho acoplado, com um atenuador óptico variável (VOA) entre os estágios [6].

Os dois amplificadores foram caracterizados para a máscara de potência definida pelos seguintes parâmetros:

- Ganho mínimo = 17 dB
- Ganho máximo = 27 dB
- Potência de entrada mínima = -28 dBm
- Potência de entrada máxima = +18 dBm

O passo ajustado foi de 1 dB. Assim, foram 11 valores de ganho e, para cada ganho, 20 valores de potência de entrada, totalizando 220 iterações.

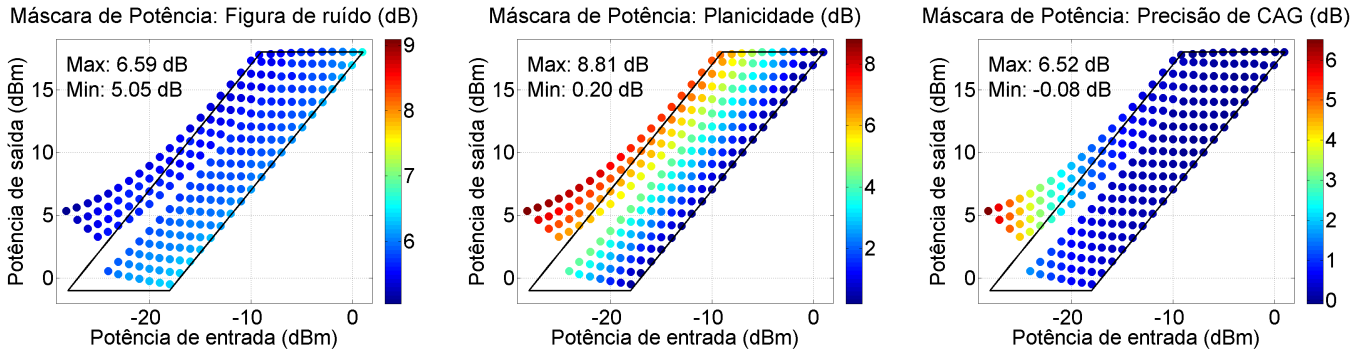
As Figuras 5 e 6 apresentam as visualizações gráficas das máscaras de potência com informação de figura de ruído, planicidade espectral de ganho e precisão de controle de ganho para o EDFA de um e dois estágios, respectivamente.

Algumas conclusões podem ser extraídas dos dados experimentais dispostos nas máscaras de potência das Figuras 5 e 6. Uma delas é a dependência da figura de ruído com o ganho para o EDFA de dois estágios e seus valores relativamente altos, de 6,26 a 9,09 dB (Figura 6a), quando comparados às figuras de ruído do EDFA de um estágio, com valores máximo e mínimo de 6,59 e 5,05 dB, respectivamente (Figura 5a). Os altos valores de figura de ruído para o EDFA de dois estágios é decorrente da utilização do VOA.

Em contrapartida, no que diz respeito à planicidade, o EDFA de dois estágios apresenta vantagem, com valores abaixo de 1,5 dB para os pontos de potência máxima de saída e inferiores a 1 dB para as demais regiões da máscara de potência, como pode ser visto na Figura 6b). Enquanto o EDFA de um estágio, apesar de apresentar boa planicidade nos pontos de ganho mínimo, chega a valores de 8,81 dB para os pontos de ganho máximo (Figura 5b). Este comportamento também é atribuído a utilização do VOA no EDFA de dois estágios, neste caso, cada estágio opera no ganho para o qual o filtro de equalização de ganho foi projetado e o VOA é ajustado para fornecer o ganho ajustado.

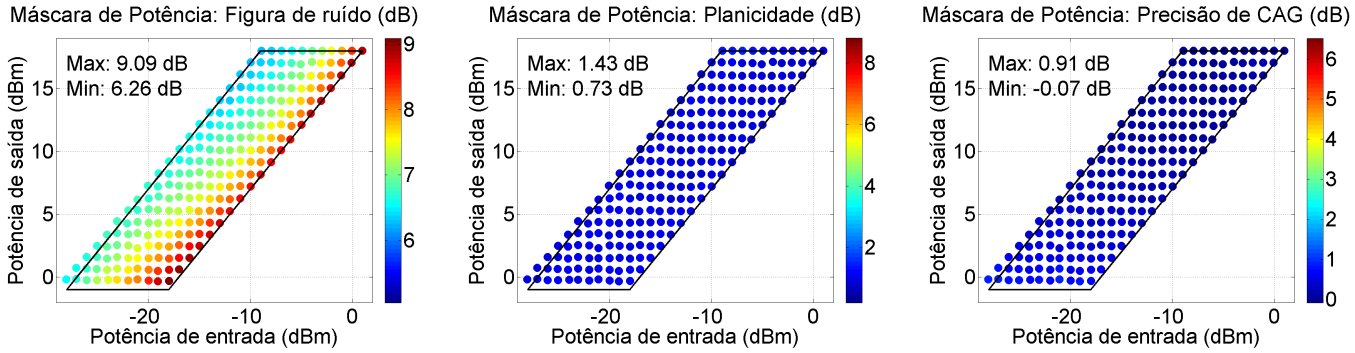
Para valores de ganho altos (24 a 27 dB) e potências de entrada baixas (menores que -15 dBm, aproximadamente), o EDFA de um estágio apresenta problemas no controle de ganho, apresentando ganho medido até 6,6 dB acima do ganho configurado (Figura 5c), enquanto o EDFA de dois estágios apresenta precisão de controle de ganho em torno de $\pm$ 0,9 dB (Figura 6c).

Assim, apesar de configurações com dois estágios permitirem alto ganho, a utilização do VOA com a finalidade de



(a) (b) (c)

Fig. 5: Máscaras de potência do EDFA de um estágio com informação de (a) figura de ruído, (b) planicidade e (c) precisão de controle de ganho.



(a) (b) (c)

Fig. 6: Máscaras de potência do EDFA de dois estágios com informação de (a) figura de ruído, (b) planicidade e (c) precisão de controle de ganho.

prover perfil espectral plano na saída do amplificador, embora melhore a planicidade, prejudica o desempenho com relação à figura de ruído, evidenciando o compromisso entre planicidade e figura de ruído.

O tempo de execução de cada iteração depende do tempo de resposta dos equipamentos de medida utilizados e do amplificador a ser caracterizado. Para as duas caracterizações realizadas, o tempo foi de 1 minuto. Assim, o tempo total gasto na etapa experimental foi de 220 minutos ou 3 horas e 40 minutos.

V. Conclusões

Neste artigo, foi apresentado um caracterizador automatizado de amplificadores ópticos em redes WDM reconfiguráveis. Por meio desta caracterização, é possível obter o desempenho dinâmico dos amplificadores ópticos para uma região do plano potência de entrada *versus* potência de saída abrangendo vários valores de ganho, denominada máscara de potência.

O desenvolvimento do caracterizador foi dividido em duas etapas, a etapa experimental, onde os dados de cada ponto experimental é capturado e a etapa de tratamento destes dados para obtenção dos parâmetros de desempenho do amplificador: figura de ruído, planicidade espectral de ganho e precisão de controle de ganho.

Dois sistemas de amplificação óptica foram caracterizados com uma duração de 3 horas e 40 minutos para cada um. Como resultado, foram geradas visualizações da máscara de potência para cada parâmetro avaliado e foi possível avaliar o desempenho do amplificador para vários pontos de operação. A caracterização de outros modelos de amplificadores pode ser realizada apenas adicionando seus comandos de leitura de potências e ajuste de ganho.

Agradecimentos

Ao suporte financeiro dado pelo FUNTTEL, FINEP e à Fundação CPqD.

Referências

[1] Agrawal, G.P., "Fiber-optic communication systems,"Wiley, 1997.
[2] Ramaswami, R. and Sivarajan, K.N., "Optical networks: a practical perspective,"Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
[3] Nascimento, V. V.; Oliveira, J. C. R. F., "Plataforma Automática para Caracterização de Amplificadores Ópticos,"MOMAG 2008,Florianópolis.
[4] JDSU: http://www.jdsu.com/ProductLiterature/wra217.ds.cms.tm.ae.pdf.
[5] Becker, P.C. and Olsson, N.A. and Simpson, J.R., "Erbium-doped fiber amplifiers: fundamentals and technology."Academic Press,1999.
[6] Abu Bakar, M. and Sheih, S. and Mahamd Adikan, F. and Mahdi, M., "Variable gain-flattened L-band erbium-doped fiber amplifier."Laser Physics,pp. 1638-1644, vol 21,2011.