

Sistema de Equalização Dinâmica de Ganho para EDFAs Aplicados a Redes Ópticas Reconfiguráveis

Vitor V. Nascimento, Júlio C. R. F. Oliveira, Vitor B. Ribeiro e Aldário C. Bordonalli

Resumo — Este artigo apresenta um sistema de equalização dinâmico de ganho (DGFF – *Dynamic Gain Flattening Filter*) aplicado a amplificadores à fibra dopada com érbio (EDFA – *Erbium Doped Fiber Amplifier*) capaz de reduzir significativamente a desigualização dos canais ópticos (cerca de 93%) introduzida pelo amplificador, devido a irregularidade do seu espectro de ganho. Com base em um conjunto de filtros ópticos senoidais controlados por tensão, um sistema de controle de temperatura, e utilizando um método de ajuste de curva (*trust-region*), foi demonstrada experimentalmente uma significativa minimização da desigualização na saída do EDFA independente do nível de sinal ou ganho.

Palavras-chaves — EDFA, DGFF, equalização, controle de ganho.

Abstract — This article shows a dynamic gain equalization system (DGFF – *Dynamic Gain Flattening Filter*) applied to erbium doped fiber amplifiers (EDFAs) capable to reduce significantly the non-uniformity of optical signals (around 93%) induced by gain spectral irregularity of optical amplifier. Based on a set of sinusoidal optical filters controlled by voltage, in a temperature control system, and using a fit adjust method (*trust-region*), a significant minimization of channel non-uniformity at EDFA output was experimentally demonstrated independently of input signal level or gain.

Keywords — EDFA, DGFF, uniformity, gain control.

I. INTRODUÇÃO

Com o aumento do tráfego nas redes ópticas, surgiu também a necessidade de desenvolvimento de técnicas adequadas para o gerenciamento deste tráfego, tornando necessário realizar roteamento e comutação na camada óptica (Redes Ópticas Reconfiguráveis) com níveis de granularidade adaptados às altas taxas de transmissão impostas ao sistema. Alterações em diferentes camadas da rede óptica estão sendo implementadas para adaptá-la aos requisitos exigidos pela rede totalmente óptica, onde o roteamento na camada óptica se faz estritamente necessário. Sendo a rede óptica composta por elementos capazes de prover reconfiguração, o número de canais que se propaga pela fibra pode mudar aleatoriamente, provocando flutuações também aleatórias na potência de entrada dos EDFA's da rede, alterando, assim, o ganho dos canais, dado que estes exibem uma severa dependência de ganho com potência de entrada.

Esta questão foi resolvida com o desenvolvimento dos amplificadores com controle automático de ganho e supressão de transientes. Uma classe muito usada são os EDFA's com controle de ganho eletrônico [2]. Mas estes amplificadores corrigem apenas diferenças de potência total entre entrada e saída, não levando em consideração os canais

individualmente, mantendo a desigualização dos canais devido à irregularidade do espectro de ganho próprio do EDFA, apesar de o ganho controlado. Existem filtros estáticos que compensam a diferença de potência dos canais com um perfil fixo, mas se tornam inviáveis quando a potência de entrada e ganho (diretamente ligado a potência de bombeio) do amplificador pode variar. Isto ocorre, pois a desigualização espectral é função do nível de inversão de população, que por sua vez, depende do nível do sinal de entrada e do ganho, para isso se torna necessário a utilização de equalizadores dinâmicos que se adaptem automaticamente as diferentes situações de potência de entrada e ganho [3-7].

Com o intuito de equalizar o ganho do EDFA, este trabalho propõe uma técnica de equalização dinâmica que se diferencia das propostas realizadas [3-7] devido à sua flexibilidade, e capacidade de ser implementada dentro dos amplificadores hoje comercializados. A técnica proposta se baseia em um conjunto de filtros sintonizáveis ligados serialmente entre si, controlados por tensão, no qual os perfis de atenuação são ajustados de acordo com a tensão aplicada em cada filtro.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. O DGFF – *Dynamic Gain Flatness Filter*

Em sistemas WDM, é importante manter todos os canais no mesmo nível de potência para evitar a degradação da relação sinal ruído. A maior causa da variação dinâmica de potência e dependência do ganho com o comprimento de onda é devido ao uso de amplificadores ópticos, em particular EDFAs [4]. Estes problemas podem levar a saturação do fotodetector e, conseqüentemente, o aumento da BER. O DGFF desenvolvido se baseia no cascadeamento de filtros ópticos senoidais com o intuito de reproduzir dinamicamente o perfil espectral desejado através da combinação harmônica dos filtros, sendo ajustado para cada um deles os valores de fase e amplitude. O princípio por trás do filtro é a obtenção de curvas espectrais suaves que podem ser representadas pela soma de senoides (Fourier) A_i , ou cossenos levantados na escala logarítmica:

$$H(w) = \sum \log A_i(w) \quad (1)$$

onde w é a frequência harmônica ou um conjunto de frequências selecionadas para o melhor ajuste da curva do espectro. A expressão geral para A_i nos filtros utilizados é apresentada na forma de uma onda senoidal:

$$A_i(\varphi, \theta, \omega) = 1 - \frac{1}{2} \sin^2(\varphi) [1 + \cos(\theta, \omega)] \quad (2)$$

onde φ controla a amplitude e θ a fase da senoide, respectivamente. O FSR (*Free Spectral Range*) da onda senoidal é determinado pela frequência harmônica w . No caso foram utilizados filtros com tecnologia opto-cerâmica, cada um com um FSR diferente. A Fig. 1 mostra o esquemático do filtro senoidal que consiste em um par de colimadores, um elemento de sintonia de fase e um de amplitude que são ajustados de acordo com a tensão aplicada nos elementos opto - cerâmicos [8].

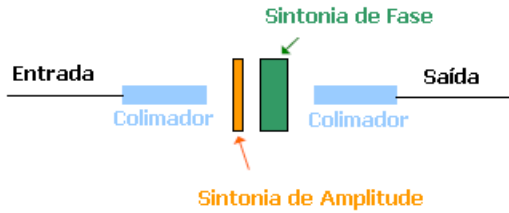


Fig.1. Esquemático do filtro senoidal.

A Tabela I ilustra os FSR de cada filtro utilizado no desenvolvimento do DGFF.

TABELA I: FSR DOS FILTROS SENOIDAIS UTILIZADOS

Filtro	1	2	3	4	5
FSR (nm)	48	24	16	12	9.6

Todos os estágios possuem dois graus de liberdade para o ajuste dinâmico, amplitude e fase, totalizando dez variáveis (5 filtros concatenados) que podem ser combinadas para obter um perfil desejado. Na Fig. 2 observa-se, como exemplo, o comportamento espectral do 3º filtro, variando sua amplitude e fase. As curvas apresentadas na Fig. 2, para distintos valores de fase e amplitude, exibem amplitudes distintas, com diferentes fases.

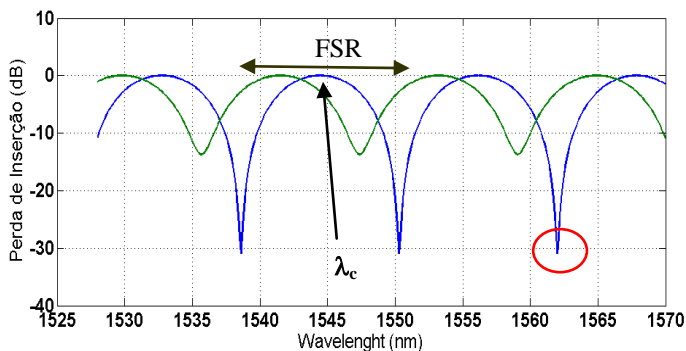


Fig.2. Perfil espectral do terceiro filtro que compõem o DGFF.

Assim, através da atuação simultânea e combinada no conjunto de filtros torna-se possível formatá-lo de forma a compensar a desigualização inserida pelo amplificador óptico. A Fig. 3 apresenta, de forma ilustrativa, uma combinação do perfil resultante dos cinco filtros, obtendo-se um perfil semelhante ao perfil de ganho de um GFF fixo

capaz de compensar para um determinado nível de inversão de população a desigualização do EDFA. No entanto, neste trabalho é demonstrada a obtenção de um GFF dinâmico (DGFF) através da atuação no conjunto de filtros senoidais, minimizando a desigualização na saída do EDFA independente do nível de inversão de população.

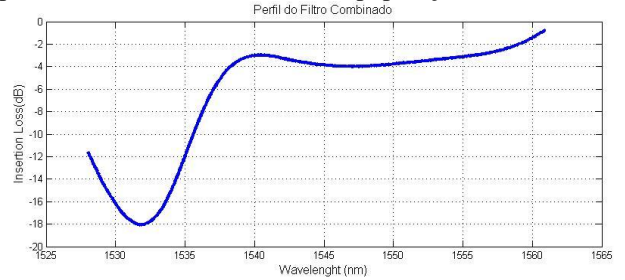


Fig. 3. Perfil do filtro com cinco estágios combinados.

B. Mapeamento do Filtro

A etapa de mapeamento consiste em conhecer cada parâmetro da Eq.(2), bem como o comportamento de amplitude e fase do filtro com a variação da tensão aplicada em seus terminais. A Eq.(2) pode ser reescrita:

$$A_i = 1 - \sin^2(\varphi_i) [1 + \cos(\theta_i + 2\pi \frac{(\lambda - \lambda_{ci} - 0.5FSR_i)}{FSR_i})] \quad (3)$$

onde,

i : estágio do filtro;

φ_i : controle de amplitude i -ésimo estágio (rad);

θ_i : controle de fase do i -ésimo estágio (rad);

λ : comprimento de onda ao longo do espectro (nm);

λ_{ci} : comprimento de onda central do i -ésimo estágio (nm);

FSR_i : Free Spectral Range do i -ésimo estágio.

Dentre esses parâmetros, o FSR e o λ_c são fixos e determinados precisamente através do perfil espectral de cada filtro (Fig. 2). O FSR é determinado pela distância entre dois picos mínimos de amplitude, o λ_c é o comprimento de onda médio entre esses dois picos. Determinados FSR e λ_c para cada filtro, se torna necessário conhecer o comportamento da variação de φ_i e θ_i com a tensão aplicada nos terminais do filtro. Para obtenção da forma do filtro na Fig. 3, foram calculados, utilizando um método de ajuste de curvas, o valor de φ_i e θ_i , ambos em radianos, para se obter o perfil apresentado. No entanto, de acordo com a variação do perfil desejado, esses dois parâmetros também variam tornando necessário conhecer precisamente a relação entre a tensão aplicada e seu respectivo valor em radianos. Para tanto é necessária a realização de um mapeamento de amplitude e de fase para cada filtro.

O mapeamento de amplitude é realizado da seguinte forma, para cada estágio: Zera-se a tensão de fase ($\theta = 0$ rad) e fixa-se uma referência em um dos pontos onde se encontra o máximo de perda de inserção do estágio, neste caso representado pela circunferência vermelha na Fig. 2. Daí, a tensão correspondente a amplitude do estágio em questão é

variada, sendo armazenado o respectivo valor de atenuação máxima para este ponto de referência. Através deste procedimento torna-se possível definir para cada tensão aplicada os parâmetros A_i e λ , (λ_{ci} , FSR_i são fixos e conhecidos para cada filtro) ficando como incógnita apenas o controle de amplitude φ , que é obtido para cada tensão pela equação 3. Através do processo de mapeamento, é obtida a curva $Tensão_i \times \varphi_i$ para cada estágio. A Fig. 4 ilustra o gráfico Tensão em Volts versus atenuação.

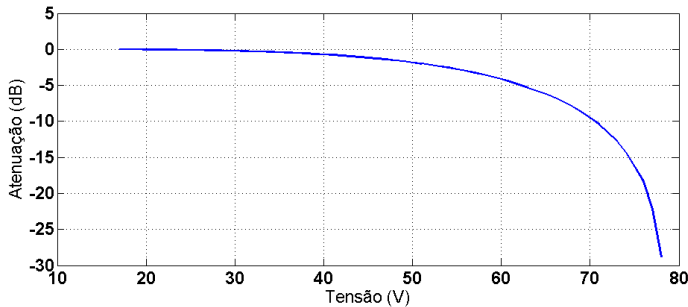


Fig. 4. Atenuação x Tensão.

Para o mapeamento de fase utiliza-se uma idéia semelhante, à realizada no mapeamento de amplitude, no entanto neste caso fixa-se a variável de amplitude φ_i e varia-se θ que é a variável de fase. Da mesma forma anterior, se estabelece um ponto de referência de perda de inserção máxima para cada filtro, daí a tensão é variada, sendo, medido o deslocamento deste pico ao longo do espectro. Os mesmos parâmetros do caso anterior são armazenados, porém para o mapeamento da fase observe que o parâmetro λ não é fixo, ele varia no decorrer do espectro. Novamente aplica-se os valores medidos na Eq. (3) para obter θ , e em seguida, é obtido um gráfico de $Tensão \times \theta$ como pode ser visualizado na Fig. 5. As rotinas de mapeamento de amplitude e fase foram construídas e automatizadas utilizando o Matlab® e com o auxílio de um OSA (*Optical Spectrum Analyzer*).

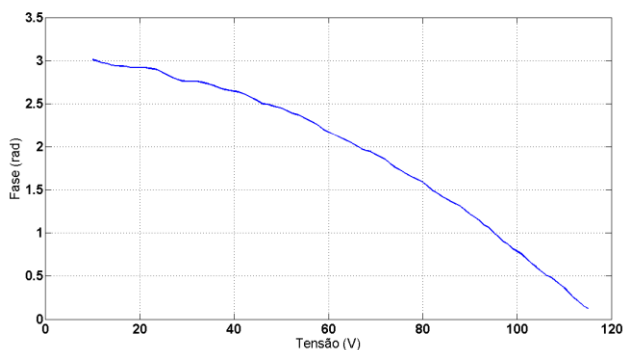


Fig. 5. Fase x Tensão.

Ao final do processo de mapeamento (amplitude e fase) tem-se um completo e preciso conhecimento do comportamento de cada filtro de acordo com a tensão aplicada. Este conhecimento é extremamente necessário, pois o método de ajuste de curva utilizado retorna parâmetros de fase e amplitude em radianos, no entanto para a aplicação prática é necessário conhecer a qual tensão o valor calculado

(em radianos) corresponde, já que a atuação digital na fase e amplitude de cada filtro é realizada via nível de tensão.

C. Método de Ajuste de Curva

Para qualquer perfil de ganho do EDFA que se deseja corrigir a desigualização, se faz necessário o cálculo dos parâmetros ótimos, φ e θ , com base nas equações que regem o comportamento dos estágios, de forma que a combinação dos filtros resulte no melhor perfil resultante (menor erro), minimizando a desigualização.

Neste trabalho é utilizado um método de ajuste de curva chamado *Trust-Region* (Região de Confiança) que possui como parâmetro de entrada o perfil do filtro desejado, retornando os coeficientes φ e θ a serem aplicados ao filtro em forma de tensão. A seguir encontra-se uma breve descrição teórica a cerca deste método, já que estudos extensivos relacionados à escolha do método de ajuste de curva ainda estão em andamento, porém, entre os testados até o momento este foi o que apresentou os melhores resultados.

Para entender o método de região de confiança para otimização, considere o problema de minimização de $f(x)$, onde a função tem vetores (perfil desejado) como argumento e retornam escalares (parâmetros ótimos). A idéia básica é aproximar f com uma simples função q no qual reflete razoavelmente o comportamento de f em uma vizinhança N em torno do ponto x . Essa vizinhança é a chamada Região de Confiança [9]. Um passo experimental s é armazenado minimizando em torno de N . Este é o problema a ser resolvido da região de confiança,

$$\min\{q(s)\} \quad s \in N \quad (4)$$

o ponto atual é atualizado para ser $x+s$ se $f(x+s) < f(x)$, caso contrário, o ponto atual permanece inalterado, N é reduzido e o passo experimental é computado novamente. No nosso caso procura-se minimizar o erro entre o formato desejado do filtro e o que se consegue obter com as suas equações. A questão chave na definição do método de região de confiança para minimizar $f(x)$ é como escolher e computar a aproximação q e como escolher e modificar a região de confiança N .

No padrão do método de região de confiança, a aproximação quadrática q é definida pelos dois primeiros termos da aproximação de Taylor para f em x ; a vizinhança N é geralmente esférica. Matematicamente o sub-problema da região de confiança é:

$$\min\left\{\frac{1}{2} s^T H s + s^T g\right\} \quad \text{talque} \quad \|Ds\| \leq \Delta \quad (5)$$

onde g é o gradiente de f no ponto x , H é a matriz de Hessian (matriz simétrica da segunda derivada), D é a matriz diagonal e Δ é um escalar positivo. Não entrando em detalhes extensivos sobre o método, é interessante conhecer que a região de confiança é um método bastante eficaz que provê um erro máximo, para o trabalho em questão, significativamente baixo limitado apenas pela equação do

filtro. Se o filtro fosse composto por um número de estágios relativamente grande, esse erro intrínseco diminuiria, pois teoricamente qualquer função pode ser representada por uma soma de senóides (Fourier), mas, em compensação, o custo iria aumentar. Por estas razões o DGFF desenvolvido baseia-se na utilização de cinco estágios, devido a um melhor *trade-off* entre custo e precisão.

III. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

A – Configuração do EDFA utilizado

A realização do experimento foi concebida com o uso de um EDFA com controle automático de ganho eletrônico com supressão de transientes. Neste o controle é realizado através da manipulação da potência do laser de bombeio baseado em um controle realimentado (Figura 5).

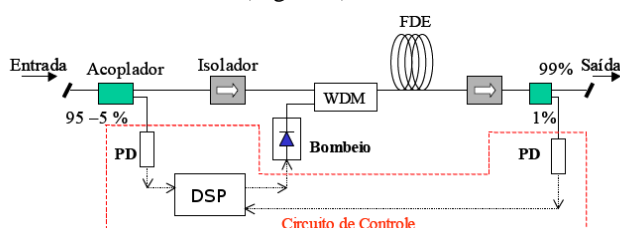


Fig. 5. Esquema de Controle de Ganho Eletrônico com Realimentação.

A estrutura deste amplificador pode ser visualizada na Fig. 5. As potências de saída e de entrada do amplificador são monitoradas calculando-se o ganho do amplificador, que por sua vez é comparado com um determinado valor desejado (*setpoint*), sendo, em seguida, corrigido através da atuação na potência do laser de bombeio até a correção do ganho.

Nesta topologia e configuração, o controle é realizado apenas levando-se em consideração a potência total de entrada e de saída, não se importando com o perfil espectral do amplificador, e conseqüentemente com a desqualificação causada por este nos canais. Assim, faz-se necessário a utilização de equalizadores dinâmicos na saída dos amplificadores para execução desta. Os equalizadores normalmente utilizados se baseiam na demultiplexação de todos os canais, em uma posterior detecção e controle através de um conjunto fotodetector e VOA para cada canal. Estas soluções são demasiadamente caras o que faz com que os operadores tentem conviver com a desqualificação imposta pelos EDFAs, limitando o alcance e o desempenho dos sistemas atuais. A idéia proposta neste trabalho vem a possibilitar o uso de um equalizador dinâmico nas redes ópticas, porém, este é baseado na compensação do perfil de ganho do EDFA e não na potência de cada canal, realizando, portanto a equalização independente das condições de carregamento da rede óptica, com um relativo baixo custo.

No EDFA utilizado (sob teste) a diferença de potência entre os canais (que adentram equalizados no EDFA) na saída do EDFA pode chegar até 18.49 dB, desqualificando completamente os canais na rede óptica, e possibilitando em uma cascata de amplificadores a superação dos limiares de mínimos de decisão para os canais com baixo ganho e os limiares superiores de potência, para os canais com ganhos

altos. Esta situação é ilustrada na Fig. 6. Atualmente filtros estáticos são utilizados no interior dos EDFAs para aplanar o ganho, porém, esta estratégia é eficaz apenas para a condição de projeto nominal do EDFA, não sendo adequada quando parâmetros como ganhos e sinal de entrada podem variar [6].

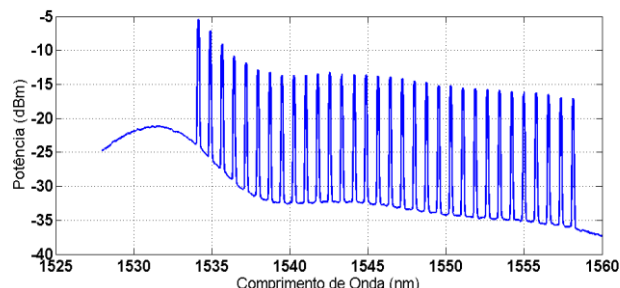


Fig. 6. Espectro de Ganho do EDFA sem o Equalizador (aumentar escala numérica).

B – Controle eletrônico do DGFF

Para atuar nos filtros de forma coordenada e obter o perfil espectral desejado, utilizou-se um microcontrolador, DAC's (*Digital Analog Converters*), ADC (*Analog-Digital Converter*), um Peltier (em vermelho na Fig. 7) e Drivers elevadores de tensão. O esquemático do sistema de controle do filtro é mostrado na Fig. 7.

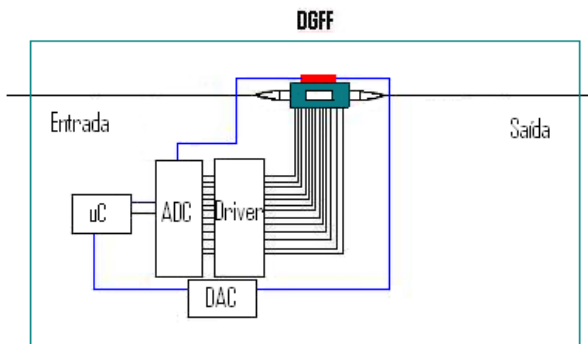


Fig. 7. Esquema de controle dos filtros que compõem o DGFF.

Para um dado perfil alvo, o microcontrolador envia os valores das tensões que devem ser aplicadas ao filtro, para os conversores digital-analógico, através da uma interface de comunicação I²C, em seguida os DAC's atuam nos drivers, que por sua vez elevam a tensão para deixar os filtros trabalhando na faixa de 0 a 350 Volts (necessária para tecnologia optocerâmica). Os filtros apresentam uma crítica sensibilidade à variação de temperatura, variando significativamente o seu perfil com a mesma. Para solucionar esse problema foi adicionado um Peltier, ilustrado em vermelho na Fig. 7, na superfície do filtro a fim de manter a temperatura constante no filtro, independente da temperatura ambiente. Para tanto a temperatura do filtro é lida em forma de tensão, que é repassada para um conversor analógico-digital, encaminhando a amostra para o microcontrolador, que por sua vez compara com uma temperatura alvo (25 °C) e atua no Peltier para mantê-la constante.

C – Arranjo Experimental

A fim de verificar a atuação do sistema de equalização montou-se um arranjo experimental composto por uma bancada com 32 lasers multiplexados, seguidos de um atenuador óptico variável, utilizado para variar a potência de entrada do sistema, o EDFA mencionado na subseção A desta seção, o DGFF (alvo deste trabalho) e, por fim, um analisador de espectro óptico (OSA). Esta configuração experimental pode ser observada na Fig. 8.

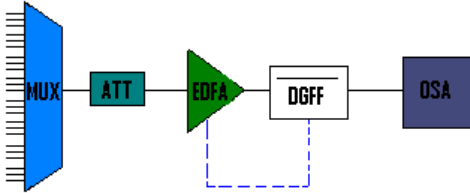


Fig. 8. Arranjo Experimental para Avaliação de Desempenho

Para a avaliação do sistema dinâmico de equalização proposto (DGFF), primeiramente foi realizado um mapeamento do perfil espectral do ganho do amplificador em função do ganho e da potência de entrada. Com esse perfil de ganho, para cada situação, foi utilizado o método *Trust-Region* para calcular o perfil do filtro ideal para cada caso, sendo, armazenados no microcontrolador, já em forma de tensão, os parâmetros de cada estágio retornado pelo método (utilizando mapeamento de fase e amplitude). A partir daí, é montada uma *lookup table* constituída dos parâmetros adequados de amplitude e fase para cada ganho e potência de entrada. Dessa maneira, para cada variação de tensão ou ganho, o filtro utiliza os parâmetros pré-calculados da *lookup table* para atuação nos filtros, de forma que a sua combinação resulte no perfil desejado. A atualização dos parâmetros é realizada com a passagem dos valores de potência de entrada e ganho através da UART (porta serial ilustrada pela linha tracejada na Fig. 8) do amplificador para o DGFF.

IV. RESULTADOS E ANÁLISES

Realizadas todas as etapas de preparação tais como mapeamento de amplitude e fase, utilização do método de ajuste de curva, controle de temperatura e programação do microcontrolador, foram obtidos os resultados apresentados a seguir para o sistema de equalização proposto. A Fig. 9 ilustra o DGFF atuando no amplificador para um ganho de 10 dB, e potências de entrada totais equalizadas de -15dBm e 3dBm, respectivamente. Para os casos de Pin=-15 e -3 dBm as desigualizações (diferença de potência entre o maior e o menor canal) verificadas sem a utilização do DGFF são de 3.94 dB e 3.66 dB, respectivamente. Já após a passagem pelo DGFF, as desigualizações obtidas são de 0.94 dB e 1.01 dB, respectivamente (redução de 75.63% e 72%), sendo o filtro ajustado dinamicamente, sem nenhuma intervenção humana.

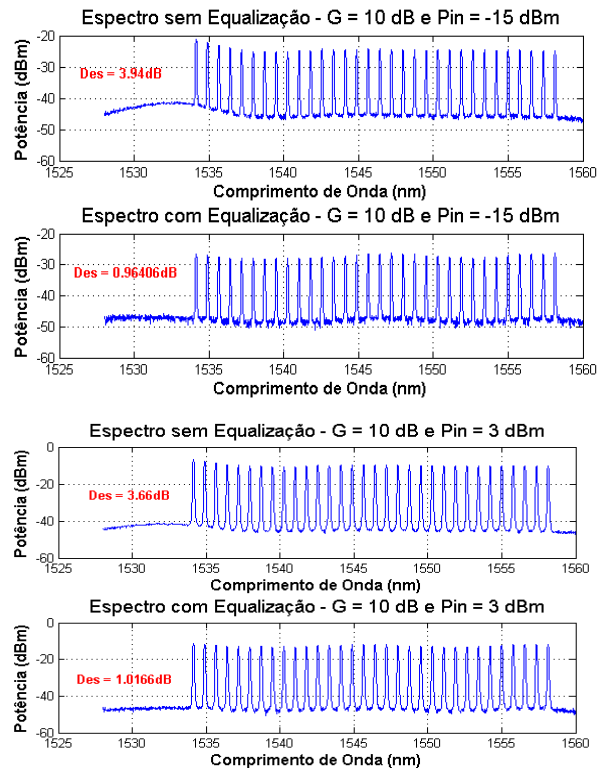


Fig. 9. Resultado experimental para $G=10$ dB com $P_{in} = -15$ e -3 dBm.

A Fig. 10, apresenta a mesma situação analisada na Fig. 9, com um ganho de 20 dB e $P_{in} = -15$ e -5 dBm.

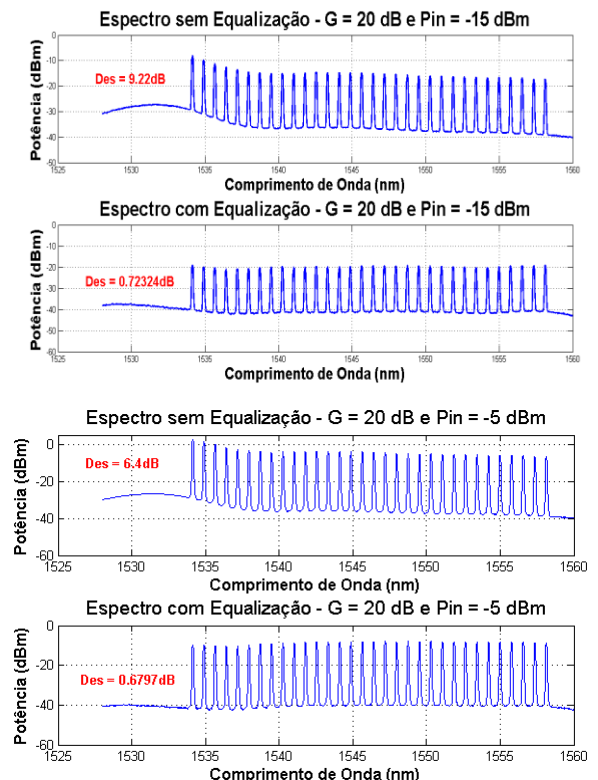


Fig. 10. Resultado experimental para $G=20$ dB com $P_{in} = -15$ e -5 dBm. Verifica-se na Fig. 10, sem a utilização do DGFF, uma desigualização de 9.22 dB e 6.4 dB para sinais de entrada de

-15 e -5 dBm, respectivamente. Após passagem pelo DGFF a desigualização resultante é reduzida para 0.72 dB (redução de 92.19%), para -15dBm de sinal de entrada e 0.67 dB (redução de 89.53%) para -5 dBm de sinal de entrada. Estes valores obtidos estão limitados pela equalização de entrada da bancada de lasers que varia em torno de 0.5 dB. Com base nos resultados obtidos, verifica-se que o DGFF desempenhou o papel esperado, minimizando significativamente o nível de desigualização imposto pelo EDFA, de forma dinâmica, sem necessidade de nenhuma intervenção humana ao longo dos testes realizados.

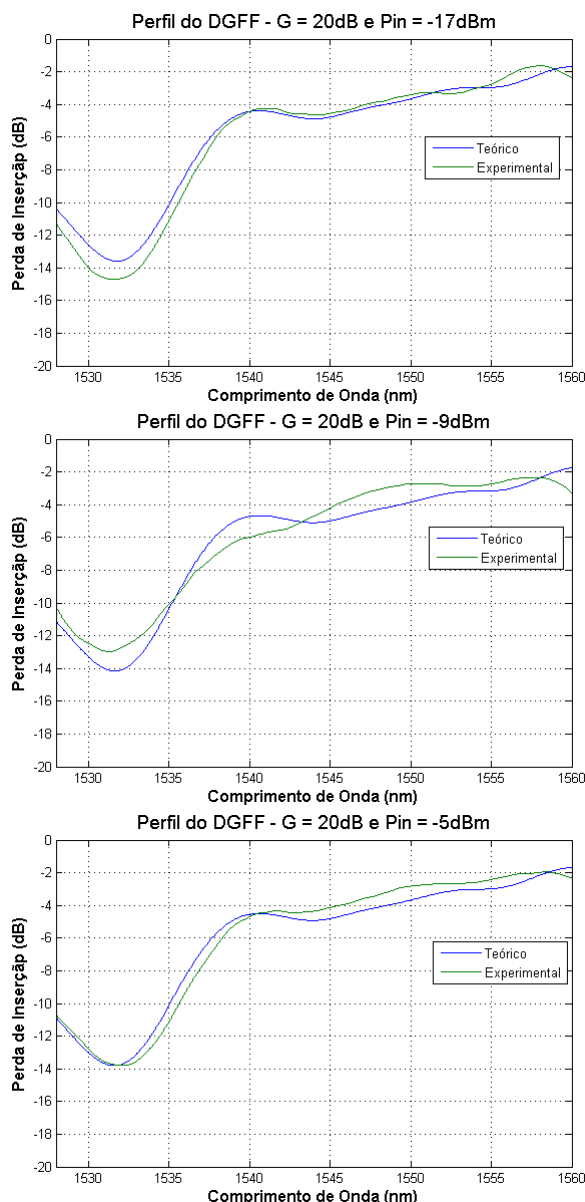


Fig. 11. Perfil Teórico e Experimental do DGFF para: (a) $G=20$ e $P_{in}=-17$ dBm; (b) $G=20$ e $P_{in}=-9$ dBm; (c) $G=20$ e $P_{in}=-5$ dBm.

A Fig. 11 ilustram o perfil do DGFF teórico, calculado pelo método *Trust-Region*, e o obtido experimentalmente após atuação com os parâmetros calculados nos cinco filtros senoidais. Verifica-se que com a variação da potência de entrada a perfil do DGFF é alterado dinamicamente, tornando

possível a compensação dinâmica das irregularidades espectrais apresentadas pelo ganho do amplificador, independente da potência de entrada ou ganho. Como se pode verificar, ainda há um erro entre o filtro calculado pelo método (teórico) e o filtro obtido (experimental). Esta diferença é atribuída à dependência residual com temperatura e às imprecisões no processo de mapeamento. Ambas as dependências estão sendo analisadas no momento e serão alvos de trabalhos futuros por partes dos autores, em conjunto com uma análise sistêmica do desempenho do DGFF em uma cadeia de EDFAs.

V. CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos conclui-se que este trabalho apresenta uma solução eficaz e de alto impacto para as redes ópticas de nova geração, sendo capaz de minimizar de forma significativa a desigualização provocada pelo uso de um EDFA em um enlace óptico. As implicações deste DGFF resultam em melhorias significativas do desempenho e alcance de sistemas ópticos de nova geração, assim como em uma maior simplicidade e redução de custos nos projetos do EDFAs utilizados. Como trabalho futuro pretende-se aprimorar cada vez mais o DGFF e mensurar os ganhos sistêmicos em redes ópticas reconfiguráveis.

REFERÊNCIAS

- [1] J. P. Ryan, WDM: North America Deployment Trends, *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 2, 1998.
- [2] J. R. F. de Oliveira, Controle Automático Eletrônico de Ganho com Supressão de Transientes Aplicado a EDFAs em Redes Ópticas WDM. Master Thesis, PPG – Programa de Pós-Graduação Unicamp, 2008.
- [3] Jun Kye Bae, Sang Hyuck Kim, Namkyoo Park e Sang Bae Lee. Dynamic EDFA Gain-Flattening Filter Using Two LPFGs With Divided Coil Heaters, *IEEE Photon. Technology Letters*. Vol. 17. No. 6. June 2005. pg. 1226-1228.
- [4] Seok Hyun Yun, Bong Wan Lee, Hyang Kyun Kim e Byoung Yoon Kim. Dynamic Erbium-Doped Fiber Amplifier Based on Active Gain Flattening with Acoustooptic Tunable Filter, *IEEE Photon. Technology Letters*. Vol. 11. No. 10. Oct. 1999, pg. 1229-1231.
- [5] P. M. J. Schiffer, C. R. Doerr, L. W. Stulz, M. A. Cappuzzo, E. J. Laskowski, A. Paunescu, L. T. Gomez e J. V. Gates. Smart Dynamic Wavelength Equalizer Based on an Integrated Planar Optical Circuit for Use in the 1550-nm Region, *IEEE Photon. Technology Letters*. Vol. 11. No. 9. Set. 1999, pg. 1150-1152.
- [6] Hyo Sang Kim, Seok Hyun Yun, Hyang Kyun Kim, Namkyoo Park e Byoung Yoon Kim. Actively Gain-Flattened Erbium-Doped Fiber Amplifier Over 35 nm by Using All-Fiber Acoustooptic Tunable Filter, *IEEE Photon. Technology Letters*. Vol. 11. No. 9. Set. 1999, pg. 790-792.
- [7] Koichi Maru, Kotaro Tanaka, Takafumi Chiba, Hideki Nonen e Hisato Uetsuka. Dynamic Gain Equalizer Using Proposed Adjustment Procedure for Thermo-optic Phase Shifters Under the Influence of Thermal Crosstalk, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 22. No. 6. Jun. 2004, pg. 1523-1531.
- [8] BATi, Boston Applied Technologies, Tech. Report.
- [9] Matlab ToolBox, Trust-Region Methods for Nonlinear Minimization.