

4

Características Estáticas e Respostas do EDFA à Realocação de Canais da Rede Óptica

Em virtude da expansão do número de usuários e, conseqüentemente, de acessos decorrentes da imensa e crescente variedade de serviços oferecidos, o tráfego de dados das redes ópticas atuais tem uma variabilidade bastante grande.

Muitos são os eventos causadores desta variabilidade, mas podemos agrupá-los em dois tipos principais: aqueles que causam alterações lentas da potência de entrada dos amplificadores, como por exemplo a realocação de canais, e aqueles que fazem com que a potência de entrada varie dinamicamente, como a transmissão de pacotes ou rajadas de dados, conforme a tendência de discretização do tráfego das redes atuais¹².

Independentemente de a variabilidade do tráfego ser lenta ou rápida, para se alcançar uma boa qualidade da comunicação é indispensável garantir que o amplificador óptico opere de forma estável, independentemente das variações de potência em sua entrada. Por isso, faz-se necessária uma técnica de controle de ganho eficiente para o amplificador [24].

O controle de ganho totalmente óptico (AOGC – *All-Optical Gain Control*) revelou-se uma boa alternativa em virtude de sua montagem realizar-se com elementos simples e baratos e seu emprego eliminar a necessidade de qualquer conversão eletro-óptica, sem prejuízo à velocidade de resposta ou à eficiência.

As topologias de AOGCs são bem variadas: uma baseia-se em uma onda estacionária dentro de uma cavidade *laser* [25]; outra faz uso de um multiplexador por divisão de comprimento de onda e um espelho para refletir parcialmente a potência de ASE [26]; e a topologia clássica emprega um filtro sintonizável no caminho de realimentação de um *laser* em uma cavidade óptica [11].

¹² Os eventos podem ser rápidos ou lentos quando comparados ao tempo de vida médio dos íons de Érbio na cavidade, de até 10 ms.

Particularmente, optamos por realizar o controle de ganho do EDFA¹³ a partir de uma oscilação *laser* em uma cavidade ressonante. Entretanto, diferentemente da topologia clássica [11,27], implementamos nossa cavidade óptica a partir de duas redes de Bragg e dois circuladores. Estes componentes possuem perda de inserção menor do que o filtro sintonizável, o que nos possibilitou uma maior versatilidade e ampliou nossa faixa de trabalho (em termos de níveis de saturação do amplificador).

Entretanto, neste tipo de controle totalmente óptico a principal dificuldade são as *oscilações de relaxação* características da cavidade ressonante estabelecida¹⁴.

Neste capítulo, depois de apresentar os resultados das medidas realizadas para conhecer as principais características estáticas do EDFA com o qual trabalhamos, como o ganho em regime de pequenos sinais, a distribuição espectral do ganho sob diferentes condições de saturação e a figura de ruído, analisaremos as respostas do amplificador com ganho controlado a variações lentas da potência em sua entrada. Além disso, apresentamos medidas de caracterização das oscilações de relaxação, que somadas às demais medidas do capítulo, nos auxiliaram a progressivamente melhorar o desempenho da técnica de controle de ganho proposta.

O comportamento do EDFA sob variações dinâmicas de tráfego, como no caso da propagação de pacotes ou rajadas de dados, será abordado nos capítulos subsequentes.

4.1

Montagem Experimental Realizada para Estudar a Resposta do EDFA à Realocação de Canais da Rede Óptica

A figura 6 a seguir ilustra a montagem experimental realizada:

¹³ Ver apêndice A.1.

¹⁴ Ver capítulo 3, seção 3.4.

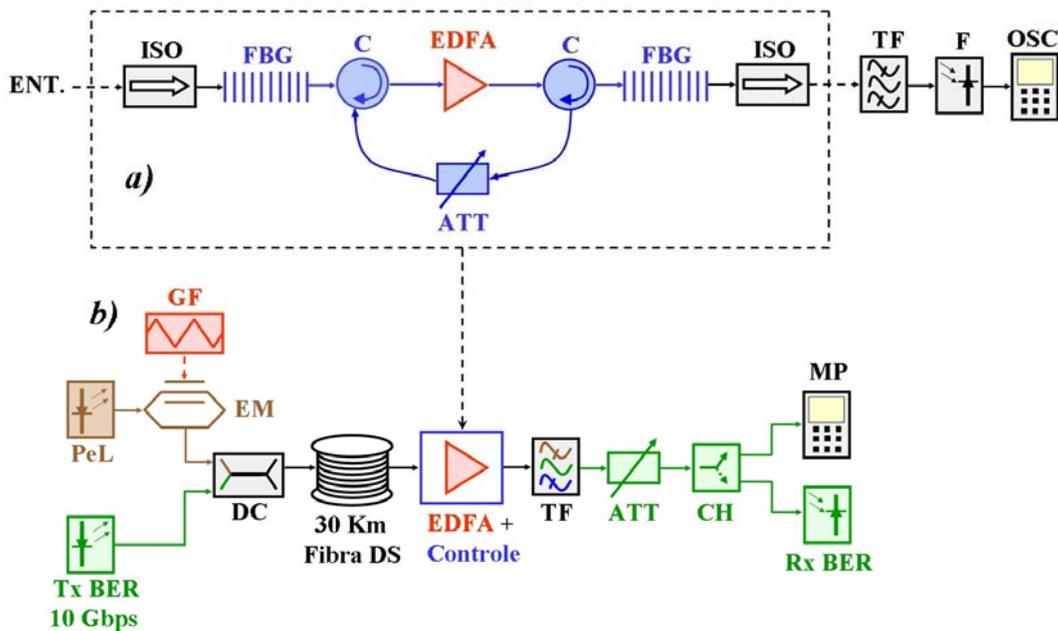


Figura 6 – (a) Controle de ganho proposto e (b) Experimento para medir a BER; Ent: Entrada; ISO: Isolador; FBG: Rede de Bragg; C: Circulador; ATT: Atenuador; TF: Filtro sintonizável; F: Fotodetector; OSC: Osciloscópio; PeL: Laser de Perturbação; GF: Gerador de funções; EM: Modulador Niobato de Lítio; DC: acoplador de 3 dB; CH: Chave óptica; MP: Medidor de potência; Tx: Transmissor; Rx: Receptor.

A técnica de controle de ganho proposta é mostrada na figura 6(a). A parcela da potência de ASE emitida pelo EDFA no comprimento de onda característico das redes de Bragg¹⁵ é refletida pela rede localizada na saída do sistema. Este sinal refletido é encaminhado ao laço de realimentação através do circulador conectado àquela rede e o nível de potência do sinal realimentado é controlado pelo atenuador. Um segundo circulador direciona o sinal realimentado à rede de Bragg da entrada do sistema, de mesmo comprimento de onda característico, que o reflete para a entrada do amplificador, completando a cavidade óptica.

Desta forma, quando a potência do sinal óptico realimentado ultrapassa o limiar inicia-se a oscilação *laser* na cavidade. De acordo com o ajuste do nível de

¹⁵ Dois conjuntos de redes de Bragg foram empregados: um com comprimento de onda de reflexão máxima em 1528 nm e outro em 1564 nm. Além de situarem-se fora da banda C deixando-a livre para a distribuição dos canais WDM, estes comprimentos de onda representam regiões distintas do espectro de emissão do EDFA [6]. Todas as redes utilizadas caracterizam-se por uma refletividade próxima de 100%.

atenuação no laço de realimentação, permite-se que a oscilação *laser* seja mais ou menos intensa, o que significa uma maior ou menor saturação do amplificador, respectivamente.

Mais especificamente, como a energia disponível inicialmente no meio amplificador é finita, pois depende principalmente da energia total fornecida pelas suas fontes de bombeio, o estabelecimento da oscilação *laser* na cavidade consome parte da energia a ser transferida aos canais a serem amplificados, ou seja, limita o ganho do EDFA.

Assim, uma vez ajustado o nível de atenuação no laço de realimentação, as variações da potência do sinal de entrada são compensadas por variações complementares da potência do *laser* na cavidade, ou seja, quando o número de canais na entrada do amplificador diminui, a potência da oscilação *laser* aumenta (pois seu ganho aumentou), e vice-versa, de forma a manter a potência de entrada do EDFA e o ganho dos canais remanescentes constante.

A figura 6(a) mostra também que dois isoladores foram conectados as redes de Bragg de entrada e saída do sistema de controle de ganho. A função principal destes isoladores é bloquear a potência de ASE que se propaga no sentido contrário ao sinal e evitar que ela penetre na cavidade óptica. Em medidas realizadas sem os dois isoladores, ao permitirmos que a potência de ASE contra-propagante penetrasse na cavidade, oscilações *laser* em comprimentos de onda aleatórios foram observadas, saturando o ganho do amplificador e limitando a eficiência do controle de ganho proposto¹⁶. Além disso, os isoladores também evitam que possíveis reflexões nas interconexões ópticas penetrem na cavidade, dando origem também a oscilações *laser* em outros comprimentos de onda que não aquele característico do conjunto de redes de Bragg empregado.

Na saída do sistema EDFA + controle, um filtro sintonizável foi usado para selecionar a potência óptica correspondente ao comprimento de onda do canal de prova, 1547 nm, de forma a poder detectá-lo e por conseguinte visualizar as variações do sinal elétrico gerado em um osciloscópio digital.

A figura 6(b) mostra a montagem experimental realizada para as medidas de BER do sistema. Nesta montagem, o sinal óptico do gerador da seqüência de *bits*

¹⁶ Ver capítulo 3, seção 3.1.

pseudo-aleatória (gerador PRBS) em 1547 nm¹⁷, sob uma taxa de transmissão de 10 Gbps (dez *giga-bits-por-segundo*), é acoplado ao sinal do *laser* de perturbação em 1532 nm. Por sua vez, o sinal do *laser* de perturbação é modulado em amplitude por um gerador de funções, emulando a adição ou depleção dos canais WDM ou o tráfego de rajadas de dados nas redes ópticas reais, dependendo do ajuste da frequência de operação.

Após o acoplador, o sinal se propaga por um lance de 30 km de fibra DS (*dispersion shifted* – dispersão deslocada), usada para emular um enlace real¹⁸. Na saída da fibra, os sinais são amplificados pelo EDFA com ganho controlado, conforme indica a linha pontilhada, e a saída do amplificador é filtrada no comprimento de onda do canal de prova, 1547 nm.

Entretanto, diferentemente da medida da figura 6(a), desta vez foi necessário variar a potência na recepção, o que justifica o emprego do atenuador. Após este, a chave óptica permite medir o nível de potência e a taxa de erros do sinal recebido, em um detector PRBS sincronizado, sem que seja necessário alterar qualquer conexão óptica.

4.2

Características Estáticas e Respostas do EDFA à Realocação de Canais da Rede Óptica

Antes de qualquer avaliação do comportamento de um EDFA, é importante conhecer algumas características estáticas do amplificador, como por exemplo, o ganho em regime de pequenos sinais e a variação espectral do ganho, relacionadas a diferentes níveis de atenuação no laço de realimentação, e a figura de ruído do amplificador em função da potência de entrada.

As figuras 7 e 8 mostram a saturação do ganho do amplificador para diferentes níveis de atenuação na realimentação, quando variamos a potência de

¹⁷ Anritsu MP1570A Sonet/SDH/PDH/ATM Analyzer.

¹⁸ Como a montagem da figura 6 (b) foi realizada para medidas de taxa de erros do sistema (BER), usamos fibra DS para evitar qualquer influência da dispersão cromática sobre os resultados. A influência da dispersão sobre a BER certamente ocorreria se a mesma extensão de fibra padrão (SMF) fosse utilizada e então algum método de compensação seria necessário.

entrada do canal de prova em 1547 nm^{19,20} a partir do nível correspondente ao regime de pequenos sinais.

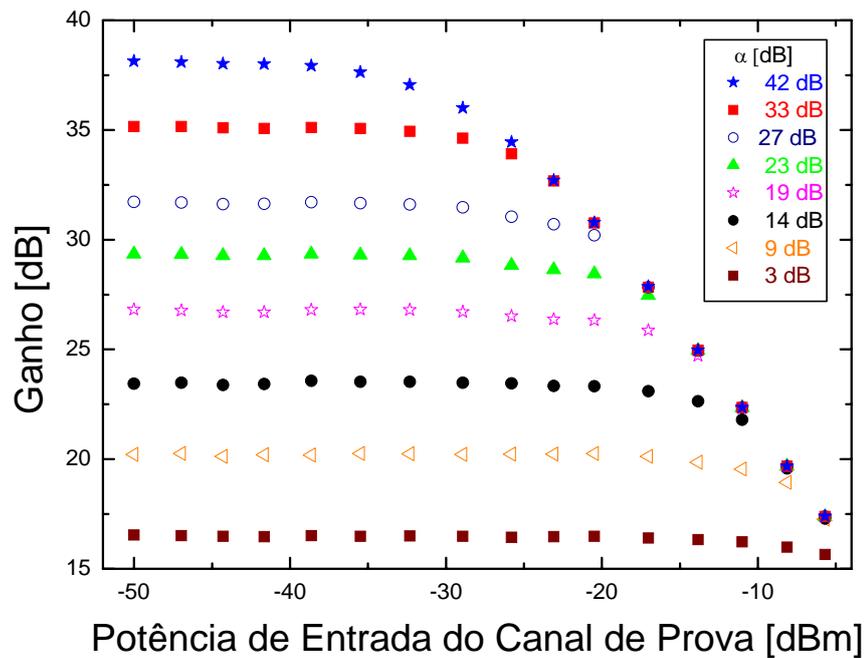


Figura 7 – Ganho em regime de pequenos sinais em $\lambda_{\text{prova}} = 1547 \text{ nm}$, quando o controle de ganho é realizado em $\lambda_{\text{FBG}} = 1528 \text{ nm}$; α é o nível de atenuação na realimentação.

¹⁹ Em todas as medidas realizadas para obtenção dos resultados apresentados neste capítulo, o sinal do canal de prova foi sempre contínuo, não modulado.

²⁰ Ver apêndice A.2.

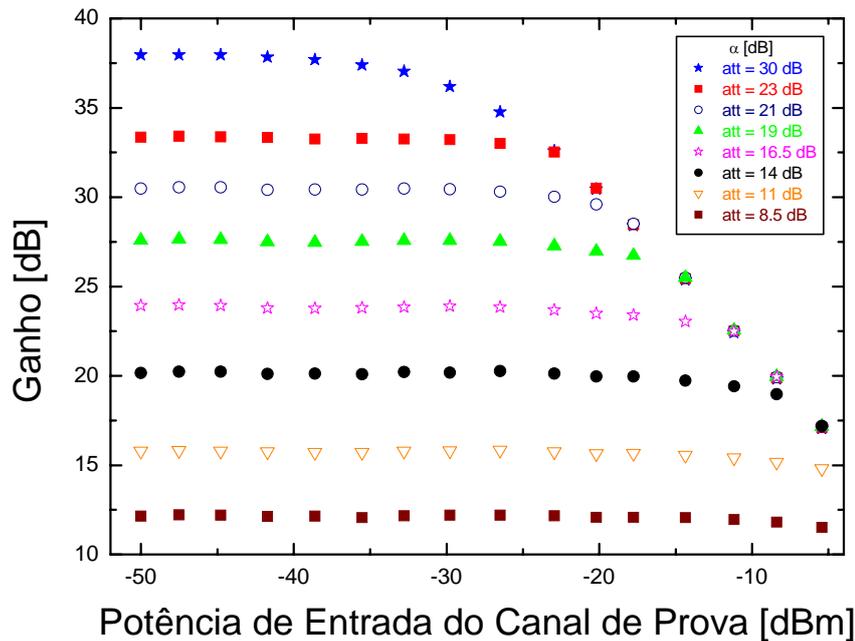


Figura 8 – Ganho em regime de pequenos sinais em $\lambda_{\text{prova}} = 1547 \text{ nm}$, quando o controle de ganho é realizado em $\lambda_{\text{FBG}} = 1564 \text{ nm}$; α é o nível de atenuação na realimentação.

O comprimento de onda de 1547 nm foi escolhido para o canal de prova por situar-se em uma região de ganho homogêneo do EDFA, espectralmente distante do pico de 1532 nm, mas próximo do comprimento de onda de atenuação mínima, 1550 nm. Além disso, este é o comprimento de onda padrão da fonte *laser* integrada ao gerador PRBS usado nas medidas de BER.

A partir da análise das figuras 7 e 8, pudemos ajustar o nível de potência de entrada dos canais de forma que eles não influenciassem na condição de saturação do EDFA, podendo-se assim avaliar somente a influência do nível do sinal realimentado. Além disso, independentemente da rede de Bragg empregada e para atenuações menores do que 14 dB, a potência de entrada do canal de prova teve pouca ou nenhuma influência sobre a saturação do amplificador.

Por sua vez, as figuras 9 e 10 a seguir mostram a variação espectral do ganho²¹ do EDFA em função do nível de atenuação no caminho de realimentação, quando cada uma das redes de Bragg é utilizada.

²¹ Ver apêndice A.3.

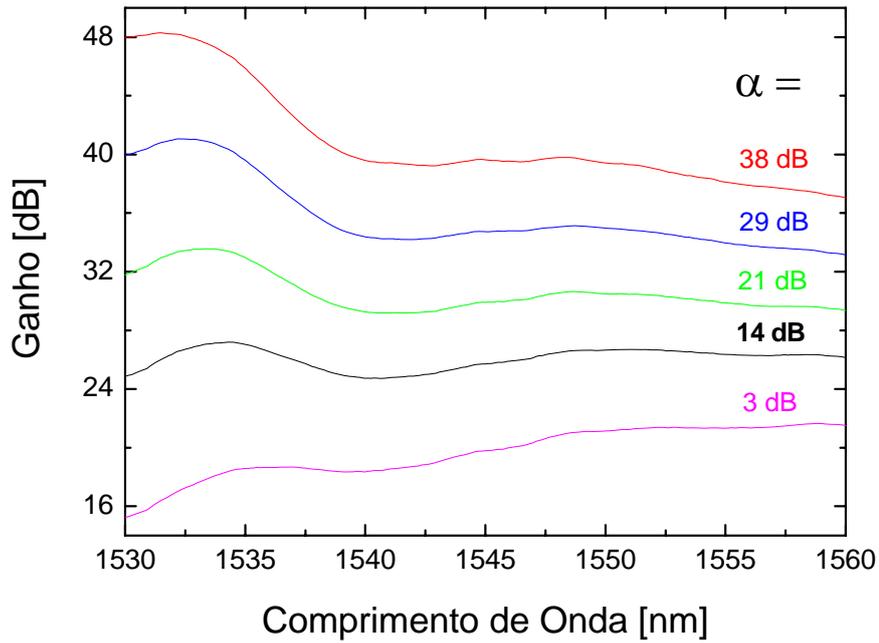


Figura 9 – Variação espectral do ganho quando $\lambda_{\text{FBG}} = 1528$ nm; α é o nível de atenuação na realimentação.

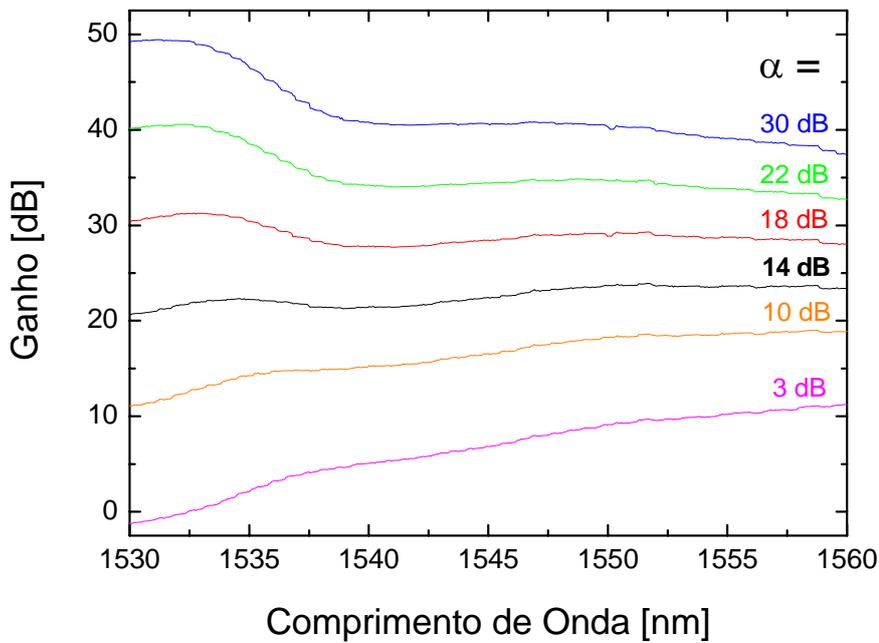


Figura 10 – Variação espectral do ganho quando $\lambda_{\text{FBG}} = 1564$ nm; α é o nível de atenuação na realimentação.

Para a obtenção dos resultados apresentados nas figuras 9 e 10, ajustamos a potência de entrada do canal de prova para -46 dBm. A escolha deste valor foi resultado da análise das figuras 7 e 8, que nos mostram que qualquer valor menor do que -40 dBm poderia ter sido escolhido, uma vez que uma potência por canal correspondente a esta faixa de valores não exerce influência sobre a condição de saturação de ganho do amplificador, independentemente da rede de Bragg empregada e do nível de atenuação no caminho de realimentação.

Por outro lado, considerando-se que a banda-passante de um EDFA é definida como a região espectral para a qual a diferença de ganho entre os comprimentos de onda é menor do que 3 dB em torno do ganho médio [6], ao observarmos as figuras 9 e 10 percebemos que ambas as redes de Bragg nos proporcionam amplas bandas-passantes, equivalentes a toda a banda C de transmissão, desde que ajustemos a atenuação no caminho de realimentação para o nível adequado.

Entretanto, as figuras 9 e 10 nos mostram também que a depleção de ganho é mais homogênea quando $\lambda_{\text{FBG}} = 1564$ nm. Esta diferenciação verificou-se porque quanto mais próximo de 1532 nm for o comprimento de onda utilizado para equalizar o ganho do EDFA, mais inhomogênea será a depleção espectral do ganho. Como a região espectral em torno de 1532 nm é a de maior ganho do EDFA [6], a depleção de ganho nesta região em virtude da oscilação *laser* em um comprimento de onda próximo será maior do que o restante da banda C.

No entanto, na medida em que diminui a atenuação no laço de realimentação, a depleção de ganho ao longo de toda a banda C é maior para $\lambda_{\text{FBG}} = 1564$ nm, apesar de elas permitirem alcançar uma banda-passante mais plana. Se tomarmos como exemplo uma atenuação $\alpha = 14$ dB, veremos que enquanto para $\lambda_{\text{FBG}} = 1528$ nm o ganho mantém-se em torno de 24 dB, com $\lambda_{\text{FBG}} = 1564$ nm o ganho alcança apenas 20 dB ao longo da banda-passante²².

Além do ganho, outro parâmetro do amplificador que precisamos conhecer antes que possamos empregá-lo em qualquer sistema de comunicação é a sua figura de ruído [28]. As figuras 11 e 12 a seguir mostram a figura de ruído do EDFA em conjunto com os dispositivos ópticos associados ao seu controle de

²² Esta diferença de desempenho entre as redes de Bragg também pode ser observada através da comparação das figuras 7 e 8.

ganho, como na figura 6 (a), no canal de prova em 1547 nm, para uma atenuação de 14 dB no caminho de realimentação e quando os comprimentos de onda de 1528 e 1564 nm foram usados para controlar o ganho do EDFA, respectivamente:

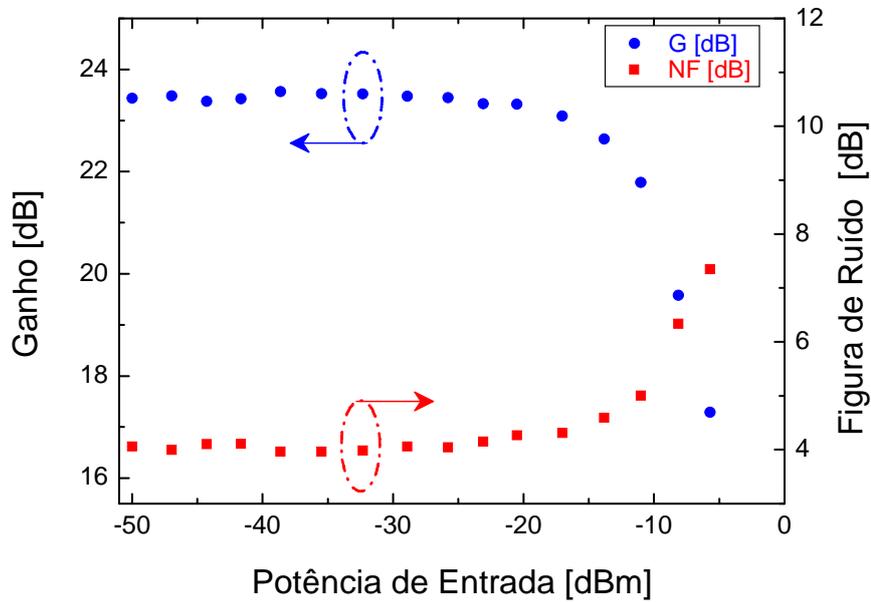


Figura 11 – Ganho e figura de ruído do EDFA + dispositivos do controle de ganho, em função da potência de entrada em $\lambda_{prova} = 1547$ nm, quando $\alpha = 14$ dB e $\lambda_{FBG} = 1528$ nm.

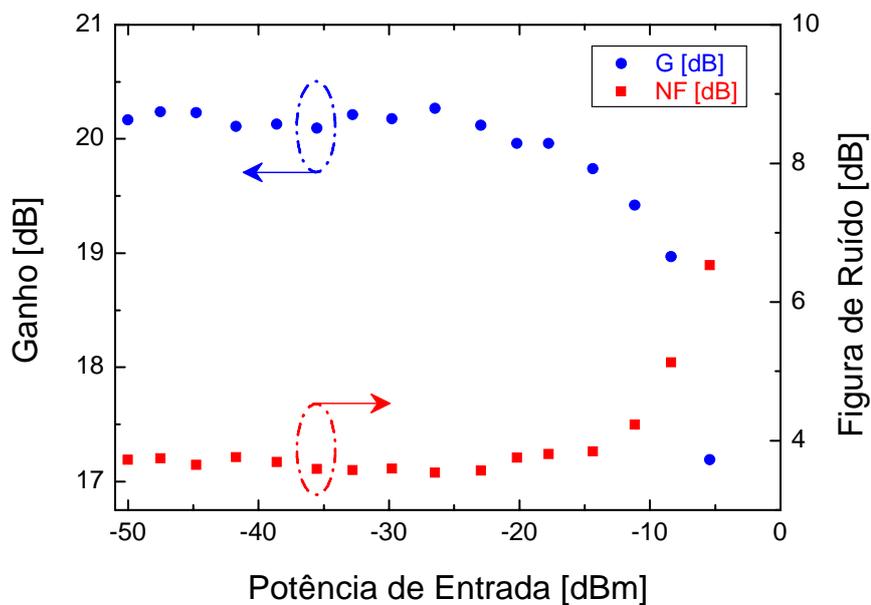


Figura 12 – Ganho e figura de ruído do EDFA + dispositivos do controle de ganho, em função da potência de entrada em $\lambda_{prova} = 1547$ nm, quando $\alpha = 14$ dB e $\lambda_{FBG} = 1564$ nm.

Mesmo que os ganhos disponíveis sejam diferentes nas figuras 11 e 12, a figura de ruído do sistema EDFA + componentes do controle de ganho permanece em torno de 4 dB para a grande maioria dos valores de potência de entrada do canal de prova.

Partindo-se do pressuposto de que uma *figura de ruído de 3 dB* é considerada o *limite quântico* para o EDFA [6], os resultados que encontramos são bastante razoáveis, uma vez que a diferença de 1 dB reflete a inclusão dos componentes que compõe o controle de ganho do EDFA, principalmente aqueles localizados antes do amplificador.

Além disso, nas figuras 11 e 12 vemos também que a figura de ruído aumenta rapidamente na medida em que a saturação do EDFA aumenta, o que acontece para potências de entrada maiores do que -10 dBm. Este efeito também é bastante normal, visto que a saturação do amplificador implica em um menor ganho disponível e, conseqüentemente, em uma menor potência do sinal de saída, o que conduz ao aumento da figura de ruído²³.

Apesar de uma ampla banda-passante ser um requisito indispensável às aplicações WDM de uma rede óptica, como vimos a sua disponibilidade está associada a operação do EDFA sob forte saturação. No entanto, nesta condição a sensibilidade do ganho do amplificador ante variações de sua potência de entrada é maior [6].

Convém salientar que os dados apresentados nas figuras 7 a 12 apenas auxiliam na escolha do nível ótimo de atenuação no laço de realimentação, mas não são suficientes. Outros parâmetros relacionados à operação do amplificador sob tráfego variável, como a variação de ganho e a magnitude dos efeitos acumulados ao longo de uma linha de amplificadores, devem nortear a decisão.

Neste sentido, a figura 13 a seguir ilustra o comportamento do EDFA em uma situação de realocação de canais, típica das redes WDM. A realocação de canais é considerada um evento lento, ou seja, a potência na entrada do amplificador sofre uma alteração brusca mas permanece em seu novo nível por um intervalo de tempo da mesma ordem de grandeza (ou maior) do tempo de vida médio dos íons de Érbio na cavidade (de até 10 ms), até que outra realocação seja necessária.

²³ Ver apêndice A.4.

Para emular a realocação de canais modulamos o sinal de um único canal em 1532 nm com potência de -11,5 dBm na frequência de 200 Hz (com *duty cycle* de 50 % ajustado no gerador de funções da figura 6 (b)). Considerando-se que o nível de potência correspondente a 1 canal é -20 dBm, este sinal modulado equivale à interrupção e ao restabelecimento periódico de 7 dentre 8 canais viajantes, sendo o oitavo o canal de prova em 1547 nm cujo ganho observamos.

A propósito, o comprimento de onda de 1532 nm foi escolhido porque representa o pior caso, ou seja, o tráfego em comprimentos de onda desta parte do espectro (1530-1535 nm) afeta de forma mais acentuada a qualidade da comunicação dos outros canais WDM do que os comprimentos de onda maiores (entre 1550 e 1560 nm)²⁴.

Além do mais, de acordo com as figuras 7 e 8, uma potência de entrada de -11 dBm (correspondente a 8 canais com potência por canal de -20 dBm²⁵) ainda não exerce influência na condição de saturação do amplificador (ou seja, não reduz o seu ganho), independentemente da rede de Bragg empregada, desde que o nível de atenuação na realimentação seja menor do que 14 dB (inclusive).

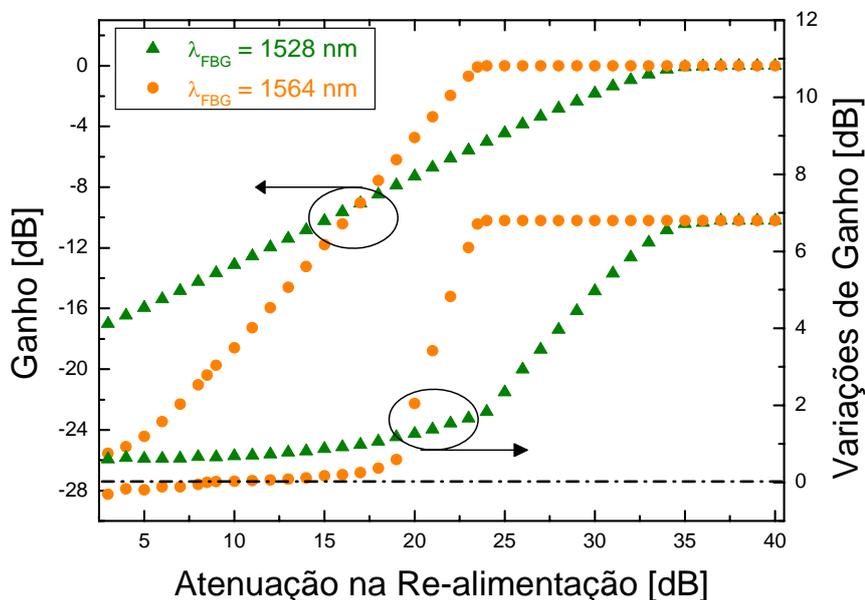


Figura 13 – Ganho e variações de ganho em $\lambda_{prova} = 1547$ nm, em função do nível de atenuação na realimentação, para ambos os conjuntos de redes de Bragg.

²⁴ A figura 22 do capítulo seguinte apresenta uma medida que comprova este efeito.

²⁵ -20 dBm + $10 \cdot \log(8) = -11$ dBm.

A figura 13 mostra como o ganho do EDFA diminui em função da crescente saturação provocada pela realimentação do sinal refletido por cada um dos conjuntos de redes de Bragg, juntamente com as variações de ganho do oitavo canal (canal de prova) provocadas pela interrupção da transmissão dos outros 7 canais²⁶.

Na medida em que a atenuação no caminho de realimentação atinge valores menores do que 35 e 23,5 dB para o uso das redes de 1528 e 1564 nm, respectivamente, inicia-se a oscilação *laser* na cavidade, o ganho diminui em virtude da crescente saturação, mas as variações de ganho são minimizadas.

Além disso, a figura 13 nos mostra que com o emprego do $\lambda_{\text{FBG}} = 1564$ nm consegue-se extinguir as variações de ganho ajustando a atenuação na realimentação para 11 dB, enquanto que se consegue apenas minimizá-las quando $\lambda_{\text{FBG}} = 1528$ nm. Neste último caso, pode-se no máximo reduzi-las a 0,6 dB, o que já é alcançado com uma atenuação de 12 dB²⁷. Uma maior saturação do amplificador somente reduziria o ganho, sem diminuir as variações, o que em última instância poderia comprometer o desempenho do sistema ao refletir-se no aumento da figura de ruído.

Segundo [29], o comprimento de onda de 1564 nm necessita de uma menor atenuação no laço de realimentação porque os parâmetros relacionados à emissão e absorção do Érbio são menores para os comprimentos de onda longos (> 1545 nm) do que para os comprimentos de onda curtos (<1540 nm, especialmente aqueles em torno de 1532 nm) e, conseqüentemente, menores ganhos também são observados.

Percebe-se que existe um “compromisso” entre o ganho que podemos obter com o amplificador e o quanto podemos reduzir de suas variações de ganho. De qualquer forma, ainda que consideremos a situação em que o mesmo nível de ganho esteja disponível em função da atenuação, o desempenho do comprimento de onda de 1564 nm é superior pois, como vimos, permite eliminar as variações de ganho em virtude das variações da potência de entrada advindas do tráfego lento, como é o caso da realocação dos canais.

²⁶ Ver apêndice A.5.

²⁷ Tanto estes valores de atenuação quanto os resultados de medidas apresentados neste capítulo (figuras 7 a 19) foram obtidos após a otimização da técnica de controle de ganho proposta.

Em suma, por oscilar em uma frequência menor, o comprimento de onda maior tem uma menor velocidade de resposta e é mais eficiente para a compensação de variações lentas de potência de entrada e de ganho do EDFA, causadas pela realocação de canais na rede óptica.

Entretanto, sabe-se que qualquer cavidade óptica tem frequências naturais de oscilação que variam, dentre outros fatores, com a perda total da cavidade [13], ou no nosso caso, com o nível de atenuação no laço de realimentação. São as chamadas *oscilações de relaxação*²⁸.

A figura 14²⁹ a seguir ilustra muito bem as oscilações de relaxação características da cavidade óptica que implementamos e a sua dependência com o nível de atenuação no caminho de realimentação:

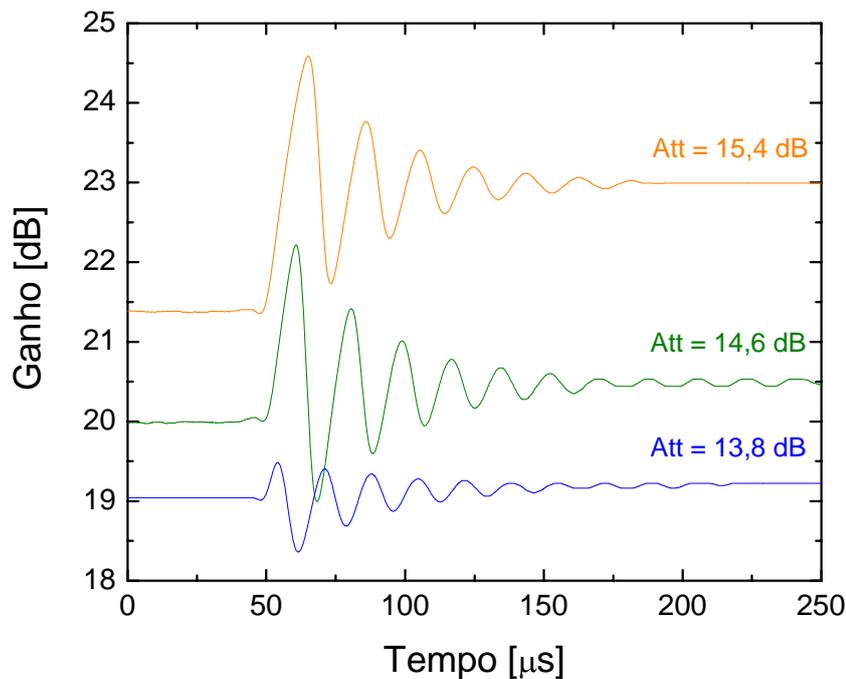


Figura 14 – Oscilações de relaxação em $\lambda_{\text{prova}} = 1547$ nm, características do *laser* em anel implementado para controlar o ganho do EDFA.

²⁸ Ver capítulo 3, seção 3.4.

²⁹ Para o restante das medidas deste capítulo, a potência por canal foi ajustada para -25 dBm na entrada do amplificador.

A figura 14 mostra as oscilações de relaxação do ganho no canal de prova, 1547 nm, para três diferentes níveis de atenuação na realimentação, com a frequência da realocação dos canais ajustada para 200 Hz³⁰. Pode-se notar que na medida em que permitimos o aumento do nível do sinal realimentado ao reduzimos a atenuação, o ganho progressivamente diminui e as oscilações de relaxação praticamente desaparecem após aproximadamente 150 μ s, apesar de suas frequências características aumentarem.

No entanto, esta é apenas uma abordagem qualitativa. Para que pudéssemos conhecer a frequência das oscilações de relaxação associadas a cada nível de atenuação no caminho de realimentação, variamos a frequência do gerador de funções da figura 6(b) entre 0 e 160 kHz e observamos os efeitos da ressonância, do sinal emitido pelo gerador com as frequências naturais de oscilação da cavidade óptica, sobre a BER do sistema no canal de prova em 1547 nm, para cada uma das redes de Bragg. A potência por canal foi mantida constante, -25 dBm.

A figura 15 a seguir mostra os resultados obtidos quando o comprimento de onda de 1528 nm foi usado na realimentação.

Convém ressaltar que variações da potência de entrada do EDFA nesta faixa de frequência, 10 e 160 kHz, não mais representam eventos lentos da rede óptica. Ao contrário, por estarem associadas a períodos que variam de 100 a 6 μ s, representam com maior fidelidade variações dinâmicas da potência de entrada do amplificador, como aquelas que seriam verificadas sob o tráfego de rajadas de dados nas redes ópticas [30].

³⁰ A frequência de 200 Hz foi escolhida para emular a realocação de canais para evitar qualquer ressonância com as oscilações de relaxação que pudesse atrapalhar a obtenção dos resultados mostrados nas figuras 13 e 14.

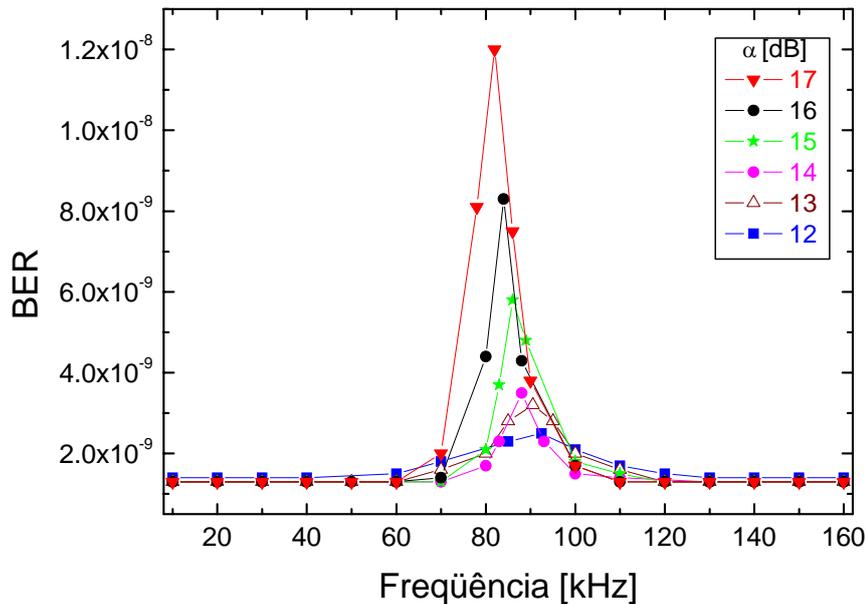


Figura 15 – Ressonância entre as oscilações de relaxação e as variações dinâmicas da potência de entrada do EDFA e sua influência sobre a BER do sistema em $\lambda_{\text{prova}} = 1547$ nm, quando $\lambda_{\text{FBG}} = 1528$ nm.

Como podemos observar na figura 15, uma excitação ressonante pode causar um aumento de uma década na BER do sistema da figura 6(b) se a eficiência da técnica de controle de ganho proposta não for máxima. Como já mencionamos anteriormente, o nível ótimo de atenuação para a rede de Bragg de 1528 nm é de 12 dB, nível que pode ser conferido também na figura 15 (curva em azul), já que a variação da BER progressivamente diminui até tornar-se insignificante na medida em ajustamos a atenuação para este valor.

Na figura 15 também é possível verificar os valores das frequências de ressonância associadas a cada nível de atenuação no laço de realimentação. Ao compararmos os valores, comprovamos que a frequência das oscilações de relaxação aumenta na medida em que a saturação do EDFA aumenta, o que está associado a diminuição da atenuação.

Relembrando o que vimos recentemente na teoria³¹, na medida em que diminuimos a atenuação no caminho de realimentação, permitindo que aumente a

³¹ Ver capítulo 3, seção 3.4.

amplitude do *laser* em anel, diminuimos a energia disponível para as oscilações de relaxação. Por conseguinte, as amplitudes iniciais das oscilações tornam-se cada vez menores e mais rápidas são as transições de $n(t)$ entre picos e vales, ou seja, as oscilações de relaxação caracterizam-se por uma frequência progressivamente mais alta.

Uma vez que conhecemos as frequências de ressonância associadas a cada nível de atenuação no caminho de realimentação, podemos medir a penalidade de potência correspondente, se ela existir, através de uma medida de BER clássica, realizando a montagem mostrada na figura 6(b).

A figura 16 a seguir mostra a BER no canal de prova em 1547 nm, em função da frequência de variação da potência de entrada correspondente a outros 7 canais, quando o comprimento de onda de 1528 nm é utilizado para controlar o ganho do EDFA e a atenuação na realimentação é ajustada para 12 dB:

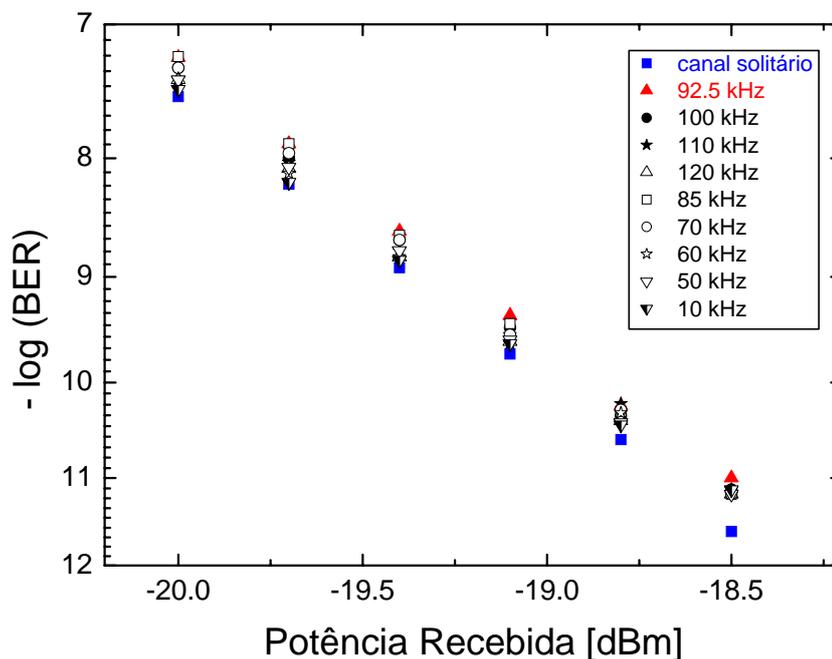


Figura 16 – BER em $\lambda_{\text{prova}} = 1547$ nm, em função da frequência das variações dinâmicas da potência de entrada do EDFA, quando $\lambda_{\text{FBG}} = 1528$ nm e $\alpha = 12$ dB.

A figura 16 aponta claramente que a frequência característica das oscilações de relaxação do *laser* em anel quando a rede de 1528 nm é usada e a atenuação na

realimentação é ajustada para 12 dB é 92,5 kHz (pontos em vermelho na figura 16). Ainda que nenhuma penalidade de potência possa ser observada, nenhum dos acréscimos na BER causados por outras frequências de excitação, maiores ou menores, equivale àquele provocado pela excitação ressonante, considerando-se esta atenuação.

Ao lembrarmos que variações da potência de entrada em frequências como as mostradas na figura 16 representam alterações dinâmicas do tráfego, encontramos naquele gráfico um bom indício da boa eficiência do comprimento de onda de 1528 nm em controlar o ganho do EDFA sob tráfego de rajadas de dados nas redes ópticas, pois mesmo no caso de uma excitação ressoante das oscilações de relaxação, nenhuma penalidade de potência foi medida.

Por sua vez, a figura 17 a seguir apresenta os efeitos da excitação ressonante sobre a BER do sistema da figura 6(b), no canal de prova em 1547 nm, em função do nível de atenuação na realimentação, quando o comprimento de onda de 1564 nm foi usado para controlar o ganho do EDFA:

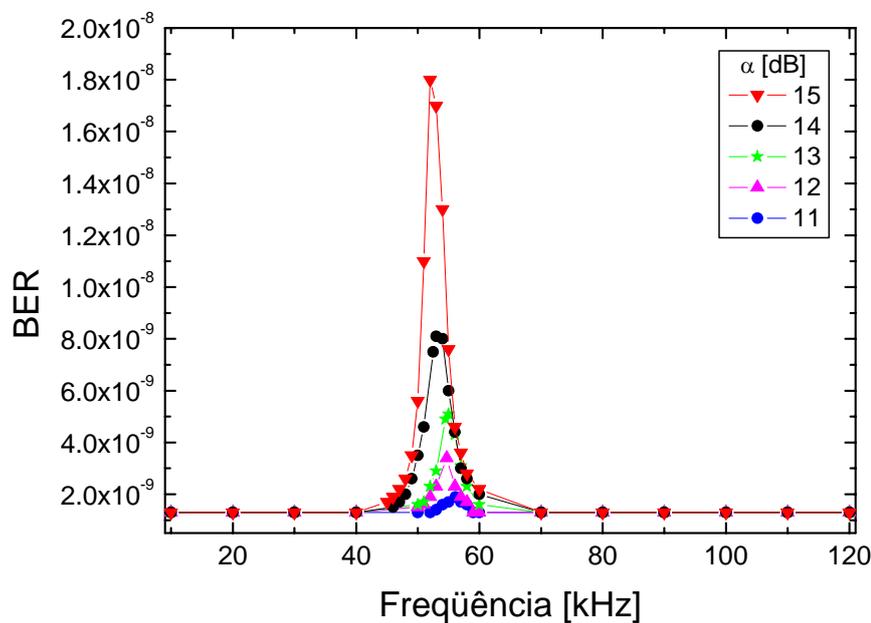


Figura 17 - Ressonância entre as oscilações de relaxação e as variações dinâmicas da potência de entrada do EDFA e sua influência sobre a BER do sistema em $\lambda_{\text{prova}} = 1547$ nm, quando $\lambda_{\text{FBG}} = 1564$ nm.

De acordo com a figura 17, o nível ótimo de atenuação para a rede de Bragg de 1564 nm é 11 dB (curva em azul), já que a variação da BER torna-se mínima quando ajustamos a atenuação para este valor.

No entanto, desta vez as frequências de ressonância são menores do que aquelas observadas na figura 15 para o comprimento de onda de 1528 nm. Em contrapartida, a BER varia mais rapidamente em virtude da excitação ressonante. Estes resultados mostram perfeita concordância com [29], ou seja, os comprimentos de onda que resultam em variações de potência maiores ou, correspondentemente, em maiores variações de BER, caracterizam-se por uma baixa frequência das oscilações (ou longos tempos para a estabilização do ganho).

A próxima figura mostra as alterações na BER do canal de prova em 1547 nm, em função da frequência de variação da potência correspondente a outros 7 canais, quando o comprimento de onda de 1564 nm é utilizado para controlar o ganho do EDFA e a atenuação é ajustada para 11 dB:

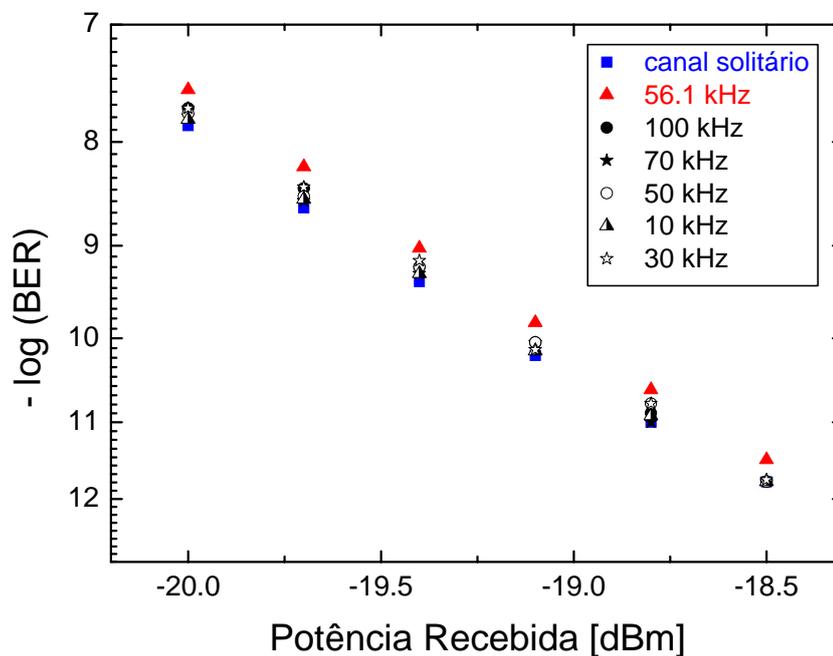


Figura 18 - BER em $\lambda_{\text{prova}} = 1547$ nm, em função da frequência das variações dinâmicas da potência de entrada do EDFA, quando $\lambda_{\text{FBG}} = 1564$ nm e $\alpha = 11$ dB.

Na figura 18, assim como na figura 16, nenhuma penalidade de potência pode ser observada e as alterações na BER do sistema da figura 6(b) em função da excitação ressonante das oscilações de relaxação também são pequenas. Entretanto, neste caso pode-se mais facilmente identificar que a frequência característica das oscilações de relaxação é 56,1 kHz quando a atenuação na realimentação é ajustada para o nível ótimo de 11 dB. Sob o ponto de vista de que variações da potência de entrada nesta faixa de frequência representam alterações dinâmicas do tráfego, esta tendência ilustrada na figura 18 indica que a eficiência do comprimento de onda de 1564 nm em controlar o ganho do EDFA pode não ser satisfatória.

À propósito, em alguns geradores PRBS utilizados para medir a BER dos enlaces ópticos (aquele que nós empregamos inclusive) aplica-se à fonte *laser* do transmissor uma modulação senoidal na frequência de 50 kHz e profundidade de modulação de 10% para eliminar o espalhamento Brillouin. Nestes casos, oscilações de relaxação como as que estudamos podem ser reforçadas em virtude da ressonância com a frequência de modulação da fonte *laser* anti-Brillouin, o que também pode causar um acréscimo na BER do sistema.

A seguir, na figura 19, as penalidades de potência mostradas referem-se às alterações na BER do sistema da figura 6(b), no canal de prova em 1547 nm, provocadas pela excitação ressonante das oscilações de relaxação associadas a cada nível de atenuação no caminho de realimentação, apresentadas nas figuras 15 e 17, quando os comprimentos de onda de 1528 e 1564 nm foram utilizados para controlar o ganho do EDFA, respectivamente³².

³² Ver apêndice A.6.

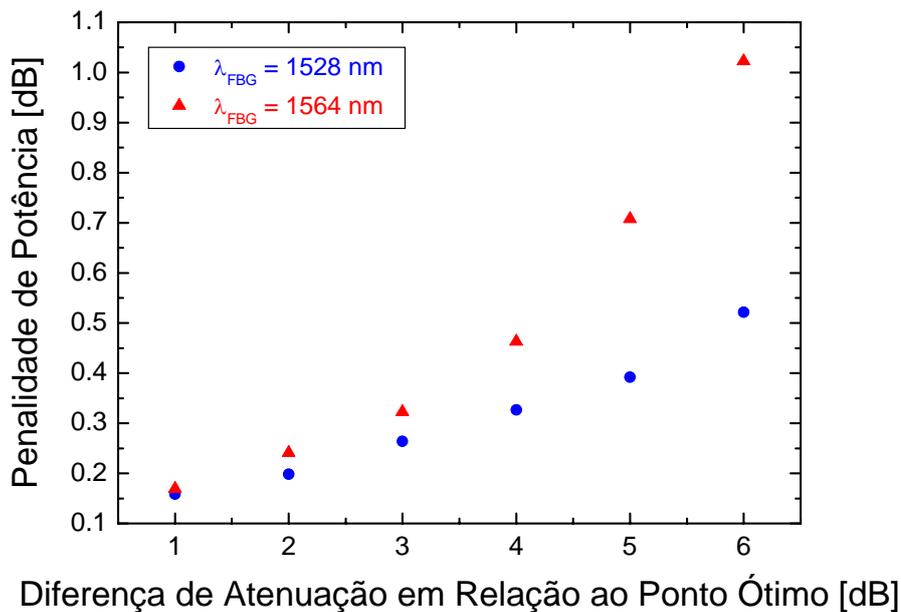


Figura 19 – Comparação entre as penalidades de potência em $\lambda_{\text{prova}} = 1547 \text{ nm}$, causadas pela excitação ressonante.

Segundo a figura 19, na medida em que o nível de atenuação diverge do valor ótimo correspondente a cada um dos comprimentos de onda do sinal de realimentação (12 e 11 dB para 1528 e 1564 nm, respectivamente), a penalidade de potência cresce de forma bem mais rápida para o comprimento de onda de 1564 nm, sendo que a diferença pode alcançar mais de 0,5 dB quando nos afastarmos apenas 6 dB do ponto ótimo de ambas as redes de Bragg.

Dentre outros motivos, esta divergência em relação ao nível de atenuação ótimo poderia ser provocada, por exemplo, pelo envelhecimento de algum dos componentes ópticos, como por exemplo um *laser* de bombeio.

Em uma situação como esta, a fonte de bombeio envelhecida não mais forneceria a mesma quantidade de energia ao meio amplificador e, com isso, a energia total circulante na cavidade seria alterada, alterando-se também o limiar para a oscilação *laser* e, conseqüentemente, o ponto de operação do conjunto EDFA + controle de ganho, que divergiria do valor ótimo previamente selecionado. Por conseguinte, o ganho do amplificador não mais estaria perfeitamente controlado e penalidades de potência tão grandes quanto aquelas mostradas na figura 19 poderiam ser observadas.

Efetivamente, a análise da figura 19 nos mostra que o controle de ganho no comprimento de onda de 1528 nm é mais robusto ao envelhecimento dos componentes ópticos do sistema EDFA + controle.

Além disso, na figura 19 encontramos novos subsídios que confirmam a tendência de que o comprimento de onda de 1528 nm é mais eficiente em controlar o ganho do EDFA sob variações dinâmicas de sua potência de entrada, como as que seriam observadas pela propagação de rajadas de dados nas redes ópticas.

4.3

Considerações Finais

Neste capítulo, apresentamos as principais características estáticas de um EDFA cujo ganho é controlado pela oscilação de um *laser* em uma cavidade ressonante formada, essencialmente, por duas redes de Bragg e dois circuladores. Também caracterizamos as oscilações de relaxação típicas da cavidade óptica implementada.

Além disso, mostramos que o comprimento de onda de 1564 nm é mais eficiente para realizar o controle de ganho de um EDFA submetido a variações lentas de potência em sua entrada, como é o caso das situações de realocação de canais, muito freqüentes nas redes ópticas.

Entretanto, quando aumentamos a freqüência de variação da potência dos canais na entrada do EDFA e excitamos de forma ressonante as oscilações de relaxação, a BER cresceu mais rapidamente e uma penalidade de potência razoavelmente maior foi observada quando a rede de 1564 nm foi usada. Estes fatos nos deram a impressão de que sob variações rápidas de potência de entrada do EDFA, como aquelas causadas pelo tráfego de pacotes ou rajadas de dados, a eficiência do comprimento de onda maior pode não ser satisfatória.

Por isso, no próximo capítulo apresentamos os primeiros resultados experimentais de avaliação do comportamento do EDFA com ganho controlado submetido ao tráfego de pacotes característico das redes WDM atuais.