

## 5

### Comportamento Dinâmico de um EDFA com Ganho Controlado sob Tráfego de Pacotes

No capítulo anterior estudamos a resposta do EDFA sob variações lentas da potência em sua entrada e vimos que é possível eliminar as variações de ganho causadas por este tipo de perturbação com emprego de técnicas AOGC. A resposta do EDFA à variação lenta do tráfego, como no caso da realocação de canais, já foi amplamente estudada e é fartamente descrita na literatura, tanto que resultados tão bons quanto os que obtivemos já foram alcançados por outros pesquisadores, como por exemplo em [3], onde com uma técnica AOGC diferente da que empregamos foi possível reduzir para aproximadamente 0,1 dB as variações de ganho originadas pela adição ou supressão de 40 canais em uma rede WDM.

Por outro lado, um estudo mais criterioso do comportamento dinâmico do EDFA quando o tráfego nos canais fosse realizado sob a forma de rajadas (*bursts signals*) ou pacotes (*packet switching*) ainda necessitava ser realizado, a fim de que se pudesse propor uma técnica de controle de ganho com eficiência compatível a tal dinamismo.

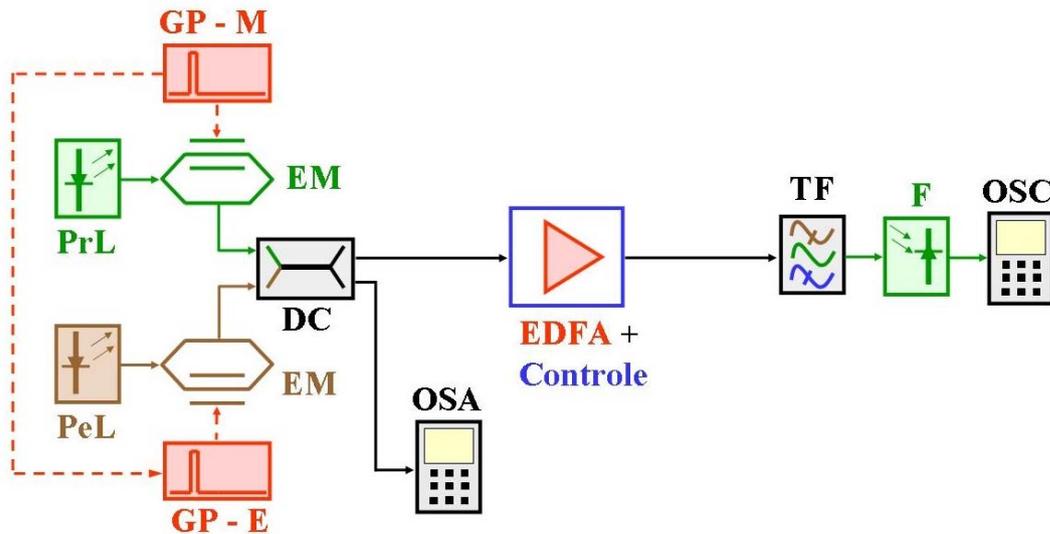
As rajadas ou pacotes dão origem a transientes rápidos que exigem uma eficiência que não pode ser alcançada com as técnicas de controle de ganho empregadas sob variação de tráfego lento, em especial porque a duração de um pacote é, usualmente, muito menor do que o período das oscilações de ganho [31]. Nestes casos, não somente a integridade dos pacotes pode ser comprometida, mas as flutuações de ganho são mais facilmente excitadas por pacotes de curta duração do que pelas flutuações de potência originadas pela realocação dos canais ou a reconfiguração das redes WDM.

Neste capítulo, avaliamos o comportamento dinâmico de um EDFA cujo ganho é controlado opticamente pela oscilação *laser* em uma cavidade ressonante, submetido ao tráfego de pacotes característico das redes WDM atuais [4].

## 5.1

### Montagem Experimental Realizada para Estudar a Resposta de um EDFA ao Tráfego de Pacotes

A figura 20 a seguir ilustra a montagem experimental realizada:



**Figura 20** – Montagem experimental realizada para o estudo da resposta do EDFA ao tráfego de pacotes; PrL: *Laser* do canal de prova; PeL: *Laser* de perturbação; GP - M: Gerador de pulsos “mestre”; EM: GP - E: Gerador de pulsos “escravo”; Modulador Niobato de Lítio; DC: Acoplador de 3 dB; OSA: Analisador de espectro óptico; TF: Filtro sintonizável; F: Fotodetector; OSC: Osciloscópio. A linha pontilhada representa o sinal de sincronismo entre os geradores de pulso.

Como podemos ver na figura 20, os pacotes ópticos de 1,25, 2,5 e 5  $\mu$ s foram obtidos a partir de dois geradores de pulso sincronizados cujos sinais elétricos de saída foram usados para modular duas fontes *laser* independentes, de potência de saída constante (CW – Continuous Wave) e cujos comprimentos de onda foram sintonizados dentro da banda C de transmissão.

As situações de colisão de tráfego entre os pacotes ópticos foram geradas como eventos isolados ou em ressonância com as oscilações de relaxação através da variação da taxa de repetição dos pulsos do gerador mestre desde 500 Hz até

100 kHz, emulando uma carga de tráfego de até 50 %<sup>33</sup>. Diferentes condições de interação foram obtidas atrasando os pulsos de um gerador em relação aos do outro, após estabelecido o sincronismo entre eles, como mostra a linha pontilhada na figura 20.

Os efeitos relacionados com o nível de potência óptica foram estudados variando-se a potência dos canais (ou seja, a potência média do pacote) entre -25, -20 e -17 dBm na entrada do amplificador. Emulou-se assim uma situação de tráfego real de pacotes na rede óptica.

Os pacotes gerados foram combinados em um acoplador de 3 dB para então propagarem-se através do EDFA com ganho controlado. A outra porta do acoplador foi utilizada para monitorar a potência de entrada do amplificador em um analisador de espectro óptico (OSA – *Optical Spectrum Analyzer*).

Para a obtenção das medidas apresentadas neste capítulo, o controle de ganho do EDFA foi realizado de forma idêntica àquela descrita no capítulo anterior, de modo que na figura 20 substituímos os componentes da técnica de controle por um único bloco *EDFA + Controle de Ganho*.

A condição de ótima estabilização do ganho do EDFA frente à flutuações da potência em sua entrada foi obtida, sob as condições supracitadas, com uma atenuação de 14 dB<sup>34</sup> no caminho de realimentação quando o comprimento de onda de 1564 nm foi usado para realizar o controle<sup>35</sup>. Além disso, a potência de saturação na entrada do EDFA (correspondente a uma redução de ganho de 3 dB) revelou-se dependente do comprimento de onda, sendo de aproximadamente -13 dBm para a maior parte dos canais da banda C, mas em torno de 5 dB menor para a região em torno do comprimento de onda de 1532 nm. A frequência das

---

<sup>33</sup> Esta carga de 50 % foi alcançada com pacotes de 5  $\mu$ s sob uma taxa de repetição de 100 kHz, que representa um período de repetição de 10  $\mu$ s.

<sup>34</sup> Somente após obter os resultados apresentados neste e no próximo capítulo otimizamos o controle de ganho para o tráfego de pacotes. Por isto o nível de atenuação para a ótima estabilização do ganho do EDFA ajustado para obter as medidas destes capítulos não coincide com o valor escolhido após a otimização.

<sup>35</sup> Neste e no próximo capítulo apresentamos apenas resultados obtidos quando o conjunto de redes de Bragg de 1564 nm foi empregado para realizar o controle de ganho do EDFA. Isto porque, como veremos no estudo comparativo do desempenho dos dois comprimentos de onda no capítulo 8, ele representa o pior caso para o tráfego de pacotes.

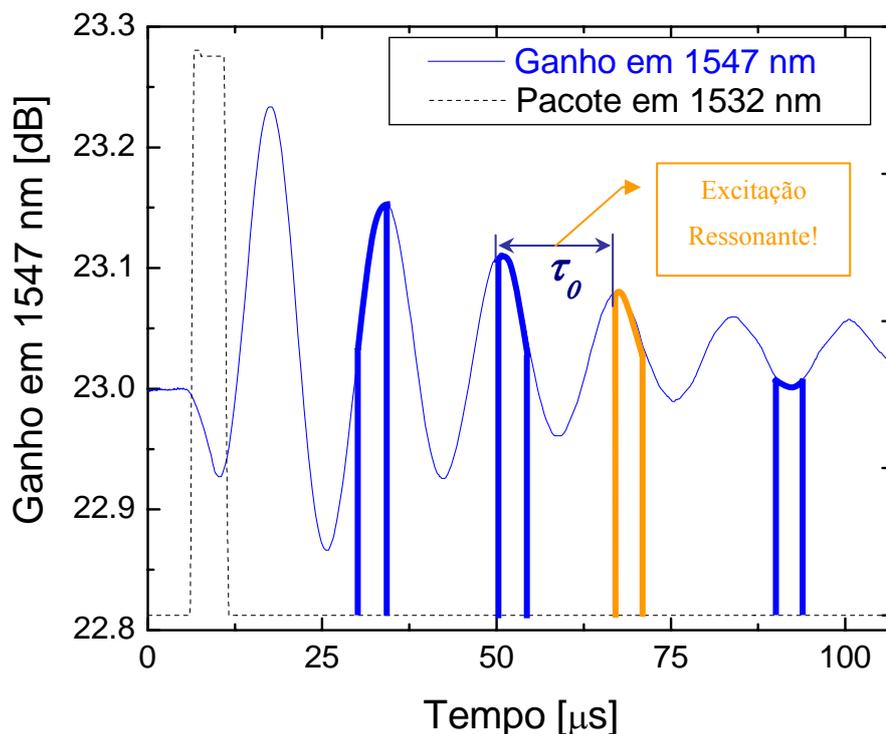
oscilações de relaxação correspondente à atenuação de 14 dB no laço de realimentação foi de aproximadamente 60 kHz [24].

De forma idêntica ao que foi realizado no capítulo anterior, 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.

## 5.2

### Respostas de um EDFA ao Tráfego de Pacotes

A figura 21 a seguir mostra as flutuações de ganho medidas no canal de prova de 1547 nm após a propagação de um único pacote de 5  $\mu\text{s}$  e potência -20 dBm no comprimento de onda de 1532 nm:



**Figura 21** – Flutuações de ganho induzidas em  $\lambda_{\text{prova}} = 1547$  nm, em virtude da propagação de um pacote de 5  $\mu\text{s}$  de largura no canal de 1532 nm, quando  $\lambda_{\text{FBG}} = 1564$  nm. A linha pontilhada e as linhas espessas coloridas representam os pacotes ópticos e  $\sigma_0$  é o período das oscilações de relaxação.

Na resposta dinâmica do EDFA mostrada na figura 21, após uma pequena redução no ganho referente à amplificação do pacote, flutuações de ganho muito maiores podem ser claramente observadas até aproximadamente 100  $\mu$ s depois de sua passagem, evidenciando que as interações entre os pacotes podem ocorrer mesmo para baixas densidades de tráfego<sup>36</sup>.

Mesmo que para um único pacote o efeito seja relativamente pequeno, um segundo pacote que for propagado pelo amplificador algumas dezenas de microssegundos depois será afetado completamente pelas flutuações de ganho de mais de 0,3 dB causadas por seu precursor.

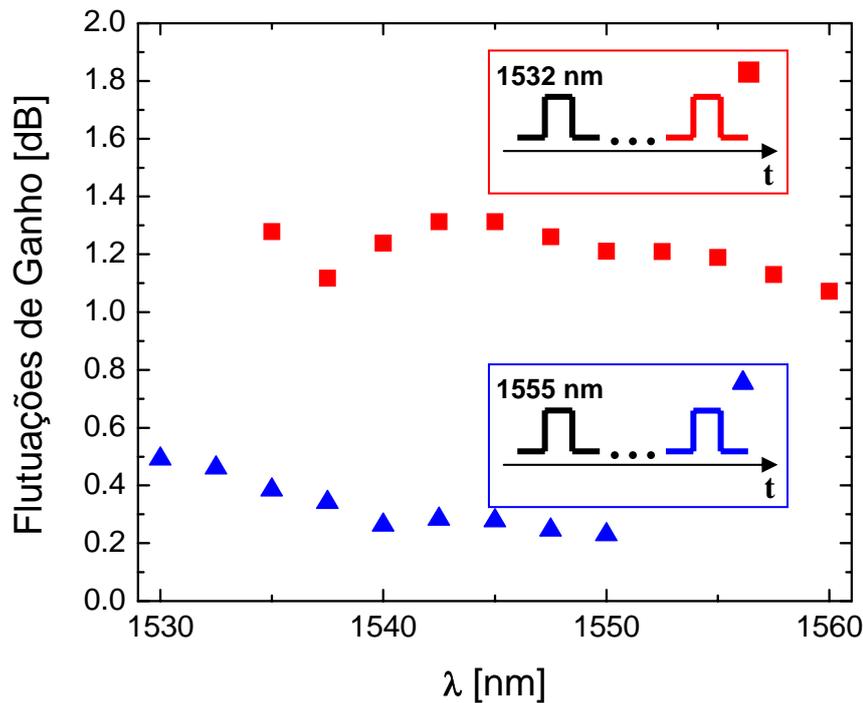
Na figura 21 foram ilustrados quatro pacotes em 1547 nm com atrasos diferentes em relação ao primeiro pacote em 1532 nm. Segundo a ilustração, tanto a potência média do pacote pode sofrer depleção como também esta depleção pode ocorrer no cabeçalho ou no corpo do pacote, dependendo do atraso relativo entre os pacotes nos diferentes canais.

Além disso, se o valor do atraso entre os pacotes a serem amplificados for próximo ao período das oscilações de relaxação, estas podem ser reforçadas por ressonância, conforme ilustrado na figura 21, dando origem a flutuações de ganho ainda maiores. De fato, penalidades de potência fortalecidas por tal ressonância em um EDFA com ganho controlado já foram observadas [24].

A dependência espectral das flutuações de ganho do EDFA, reforçadas por ressonância em dois comprimentos de onda diferentes, é ilustrada na próxima figura:

---

<sup>36</sup> Ou seja, para frequências de repetição dos pacotes bem menores do que 100 kHz ou períodos de repetição tão grandes quanto uma centena de microssegundos.



**Figura 22** – Dependência espectral das flutuações de ganho para excitações ressonantes das oscilações de relaxação em 1532 e 1555 nm, quando  $\lambda_{\text{FBG}} = 1564$  nm.

Para obter os resultados da figura 22, a frequência de repetição dos pacotes em um dos dois canais (1532 ou 1555 nm) foi ajustada para coincidir com a frequência natural de oscilação da cavidade relacionada a atenuação de 14 dB no laço de realimentação, enquanto que a amplitude *pico-a-pico* das flutuações de ganho nos demais canais da banda C foi medida em função do comprimento de onda.

Como mostra a figura 22, as flutuações de ganho<sup>37</sup> são muito maiores se excitadas pela variação do tráfego de um canal cujo comprimento de onda esteja próximo de 1532 nm, região espectral em que o ganho do EDFA é maior.

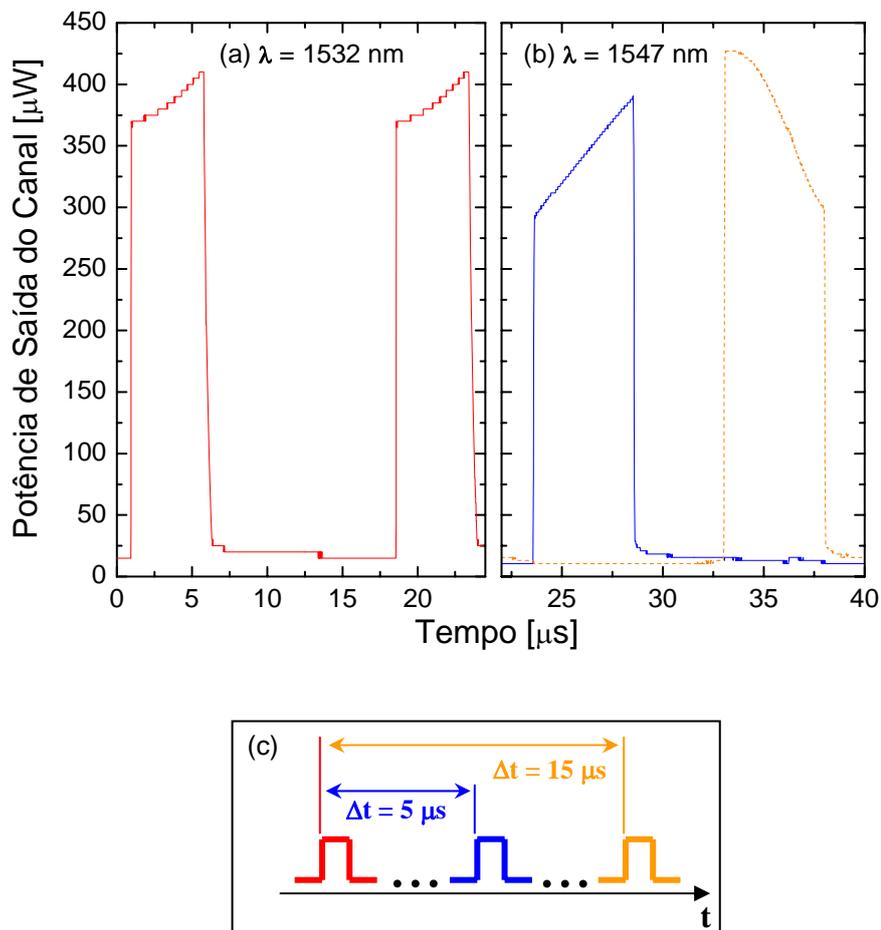
Isto confirma que o tráfego em comprimentos de onda desta parte do espectro (1530-1535 nm) afeta de forma mais acentuada a qualidade da comunicação em todos os outros canais WDM, enquanto que menores implicações serão observadas em virtude do tráfego em comprimentos de onda

<sup>37</sup> Ver apêndice A.7.

maiores, especialmente aqueles espectralmente situados no outro extremo da banda C (entre 1550 e 1560 nm).

Além disso, ao compararmos os dados da figura 22 com aqueles da figura 21 para o comprimento de onda de 1547 nm, observamos que as flutuações de ganho são muito maiores se excitadas de forma ressonante do que se forem originadas por um único pulso ( 1,3 dB contra 0,3 dB, respectivamente).

Como já mencionamos, mesmo que para o tráfego de um único pacote as implicações possam ser relativamente pequenas, um segundo pacote a propagar-se pelo amplificador pode ter sua potência fortemente alterada pelas flutuações de ganho do amplificador. Por conseguinte, a figura 23 mostra a potência dos pacotes amplificados sob diferentes condições de tráfego:



**Figura 23** - (a) Depleção da potência dos pacotes em  $\lambda = 1532 \text{ nm}$ , com frequência de repetição igual à de ressonância; (b) Pacotes amplificados em  $\lambda = 1547 \text{ nm}$ , com atrasos diferentes em relação aos pacotes do item (a); (c) Ilustração dos atrasos entre os pacotes do item (b);  $\lambda_{\text{FBG}} = 1564 \text{ nm}$ .

Na figura 23 (a), pacotes em um único canal de 1532 nm são transmitidos, com potência de -17 dBm e uma carga de tráfego de 33%, que corresponde a uma frequência de repetição próxima da frequência de ressonância. As oscilações de relaxação são reforçadas pela excitação síncrona e sua fase relativa é resultado do batimento entre a frequência natural de oscilação da cavidade (para uma determinada atenuação no laço de realimentação) e a frequência de repetição dos pacotes, ou seja, a frequência de excitação.

Por isso, podemos observar uma depleção da potência óptica do cabeçalho (*header*) ou do corpo do pacote (*payload*), dependendo se a frequência de repetição dos pacotes está acima ou abaixo da frequência de ressonância, respectivamente. No caso da figura 23 (a), observamos que a potência do cabeçalho do pacote é depletada no mínimo 10% a mais do que a potência do corpo do pacote.

Já na figura 23 (b), apresentamos o sinal correspondente a pacotes ópticos no canal de 1547 nm, amplificados após a transmissão de outro pacote no canal de 1532 nm, ilustrando uma situação de interação entre canais. Esta situação é apresentada para dois atrasos diferentes entre os pacotes dos dois canais. Neste caso, a potência do canal foi ajustada para -20 dBm.

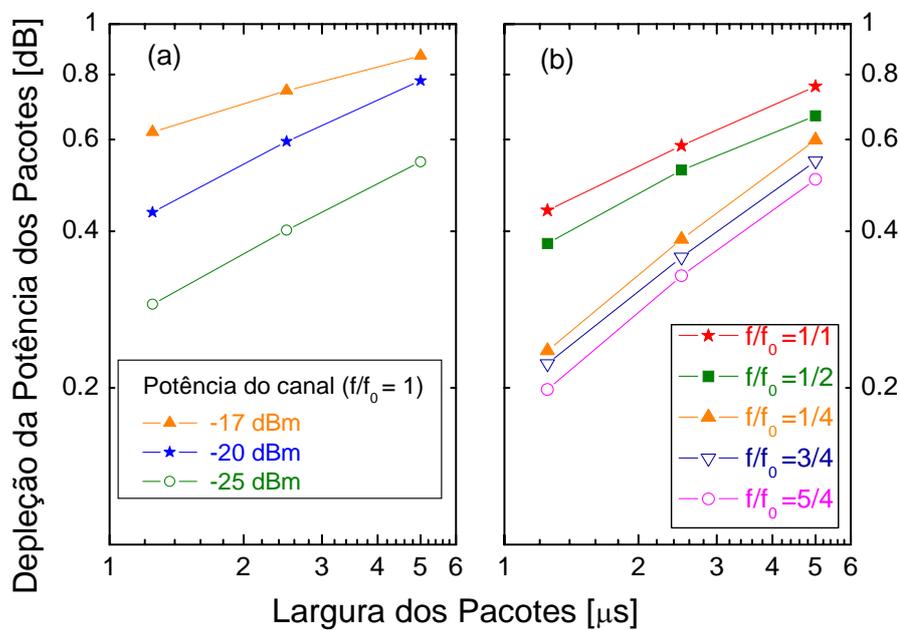
Desta vez tanto a potência média do pacote pode sofrer depleção como também esta depleção pode ocorrer no cabeçalho ou no corpo do pacote, dependendo do atraso relativo entre os pacotes nos diferentes canais. No caso da figura 23 (b), especificamente, um atraso menor (5  $\mu$ s) implica em uma queda na potência do cabeçalho do pacote de aproximadamente 25 %, enquanto que um atraso maior (15  $\mu$ s) causa uma queda no corpo do pacote de 30% em relação ao cabeçalho.

Obviamente, a excitação síncrona, em virtude da frequência de repetição dos pacotes aproximar-se da frequência das oscilações de relaxação, pode não parecer uma situação muito comum em uma rede onde os tempos de chegada dos pacotes obedece a uma distribuição de Poisson [32].

Entretanto, esta distribuição estatística conduz à similaridade do tráfego agregado [33]. Por sua vez, a característica de similaridade do tráfego significa que as oscilações de relaxação podem ser excitadas por apenas alguns poucos pacotes transmitidos através da rede óptica, desde que o atraso entre eles seja próximo do período das oscilações de relaxação [4].

Portanto, é necessário o emprego de uma técnica de controle de ganho para o EDFA com eficiência comprovada em uma rede cujo tráfego dos canais faz-se sob a forma de rajadas ou pacotes. Como mostraremos nos próximos capítulos<sup>38</sup>, esta necessidade é ainda maior em grandes lances de fibra onde muitos amplificadores são usados em cascata e cada unidade opera próximo da saturação, pois neste caso as flutuações de ganho são cumulativas [34].

Ainda considerando apenas um EDFA, a figura 24 a seguir mostra a depleção da potência de pacotes<sup>39</sup> no canal de 1547 nm em função do tamanho e da potência dos pacotes transmitidos simultaneamente no canal de 1532 nm:



**Figura 24** – Depleção da potência de pacotes em  $\lambda_{\text{prova}} = 1547$  nm, em função do tamanho dos pacotes transmitidos simultaneamente em  $\lambda = 1532$  nm; (a) Efeito da potência dos canais com taxa de repetição dos pacotes coincidente com a frequência das oscilações de relaxação  $f_0$  (b) Efeito da frequência de repetição dos pacotes;  $\lambda_{\text{FBG}} = 1564$  nm.

Na figura 24 (a) a taxa de repetição dos pacotes no canal de 1532 nm foi ajustada para estar em ressonância com a frequência das oscilações de relaxação.

<sup>38</sup> Capítulos 6 e 8.

<sup>39</sup> Ver apêndice A.8.

Como esperado, os efeitos são tão menores quanto menores forem a potência de entrada e/ou a largura dos pacotes, mas ainda significativos mesmo para os menores valores.

É importante também notar que as excitações ressonantes podem ocorrer não apenas em uma frequência igual a das oscilações de relaxação, mas também em suas sub-harmônicas. Na figura 24 (b) variamos a frequência de repetição dos pacotes no canal de 1532 nm e medimos a depleção de potência correspondente nos pacotes do canal de 1547 nm. Em todos os casos observamos que o efeito é máximo quando a frequência de repetição dos pacotes é igual à frequência de ressonância  $f_0$ . Entretanto, os efeitos ainda são consideráveis nas frequências dos sub-harmônicos  $1/2 f_0$  e  $1/4 f_0$ , ainda mais se comparados aos efeitos originados por outras frequências de excitação,  $3/4 f_0$  e  $5/4 f_0$ .

### 5.3

#### Considerações Finais

Neste capítulo, aprendemos várias características do comportamento dinâmico de *um* EDFA com ganho controlado, submetido ao tráfego de pacotes característico das redes WDM atuais.

Vimos que as oscilações de relaxação características de um EDFA com ganho controlado por um *laser* em anel podem ser reforçadas e manter-se de forma ressonante dependendo dos tempos de chegada e da interação entre os pacotes nas redes ópticas atuais.

Além disso, se o valor do atraso entre vários pacotes a serem amplificados for próximo ao período das oscilações de relaxação, estas podem ser reforçadas por ressonância, dando origem a flutuações de ganho ainda maiores.

Mesmo que para um único pacote o efeito seja relativamente pequeno, um segundo pacote que for propagado pelo amplificador algumas dezenas de microssegundos depois será afetado completamente pelas flutuações de ganho causadas por seu precursor.

Confirmamos que as flutuações de ganho são muito maiores se excitadas pela variação do tráfego de um canal cujo comprimento de onda esteja próximo de 1532 nm, região espectral em que o ganho do EDFA é maior.

Aprendemos também que as flutuações de ganho são muito maiores se excitadas de forma ressonante do que se fossem originadas por um único pulso.

Pudemos observar que tanto a potência do cabeçalho (*header*) quanto do corpo (*payload*) do pacote podem sofrer depleção, dependendo se a frequência de repetição dos pacotes está acima ou abaixo da frequência de ressonância, respectivamente.

Os efeitos são dependentes do comprimento de onda dos canais, da potência dos pacotes e, como mencionado, do atraso relativo entre os pacotes transmitidos através do EDFA. Tanto a potência média do pacote pode sofrer depleção como também esta depleção pode ocorrer no cabeçalho ou no corpo do pacote, dependendo do atraso relativo entre os pacotes nos diferentes canais.

Caso o valor do atraso entre os pacotes seja próximo ou igual ao período das oscilações de relaxação, maiores flutuações de ganho serão observadas. No entanto, ainda que esta excitação ocorra em frequências próximas dos sub-harmônicos das oscilações de relaxação, os efeitos ainda serão consideráveis e, em ambas as situações, podem ser reforçados e manter-se de forma ressonante. Isto mostra que as interações entre os pacotes podem ocorrer mesmo para baixas densidades de tráfego.

No próximo capítulo, investigamos os efeitos acumulados ao longo de uma linha de amplificadores idênticos, emulados através da técnica dos laços recirculantes.