UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE ESCOLA DE ENGENHARIA MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

CARACTERIZAÇÃO DA DINÂMICA DO GANHO DE AMPLIFICADORES ÓPTICOS DE FIBRAS DOPADA COM ERBIO

LUIZ FERNANDO DA SILVA

LUIZ FERNANDO DA SILVA

CARACTERIZAÇÃO DA DINÂMICA DO GANHO DE AMPLIFICADORES ÓPTICOS DE FIBRAS DOPADA COM ERBIO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Comunicações Ópticas.

Orientador: Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero

Niterói

2015

LUIZ FERNANDO DA SILVA

CARACTERIZAÇÃO DA DINÂMICA DO GANHO DE AMPLIFICADORES ÓPTICOS DE FIBRAS DOPADA COM ERBIO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Comunicações Ópticas.

Aprovado em 26 de março de 2015

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero - Orientador
Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Vinícius Nunes Henrique Silva Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Ricardo Alberto Olivares Vélis- Co-Orientador
Universidade Técnica Federico Santa Maria/Chile

Niterói

2015

Dedico este trabalho a minha esposa, as minhas filhas, minha mãe, irmã e em memória de meu saudoso pai, cujos exemplos são fontes constantes de inspiração e motivação nas jornadas da minha vida.

Agradecimentos

A Deus Princípio e Fim de tudo de quem me vêm a saúde e forças para superar os obstáculos.

Ao Programa de Mestrado de Telecomunicações e todo seu corpo docente, coordenação - na pessoa da professora Dr. Leni Joaquim, direção, equipe administrativa que pelo apoio, presteza e dedicação que possibilitaram a realização do curso de maneira eficiente dentro do ambiente de respeito, ética e amizade.

Ao meu orientador professor Dr. Andrés Pablo Lopez Barbeiro, por seu suporte, incentivo, alertas, correções ao longo de todo processo de trabalho.

Ao meu coorientador o professor Dr. Ricardo Olivares, por seu apoio incondicional, amizade e parceria a quem considero uma honra sem igual ter tido a oportunidade de conviver e trabalhar.

Ao professor e Dr. Vinicius Henrique Nunes pelas ótimas conversas técnicas e incentivos nos momentos de troca de experiências ao longo do trabalho.

Aos amigos e companheiros de Lacop de um modo geral, representados na pessoa do Eng^o Gubio Oliveira, Sydney Bragantine e Pressley Neto, ao amigo Andrés Gómez da Universidade Frederico Santa Maria- Chile que tive a alegria de trabalhar em conjunto em parte dos experimentos.

A minha família por suportar os momentos de ausência e pelo apoio e carinho nos momentos mais desafiadores deste trabalho.

Aos colegas de trabalho, minha chefia e a Direção da Administração do Campus da Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ) pelo apoio, incentivo e compreensão ao longo do meu afastamento para poder realizar o programa sem comprometer os prazos e inúmeras demandas que estava envolvido.

Enfim a todos (as) que de maneira direta e indireta contribuíram ao longo do processo de formação, de coração meu muito obrigado.

	_			c
Ľ	p1	gr	a	te

"Os que desprezam os pequenos acontecimentos nunca farão grandes descobertas. Pequenos momentos mudam grandes rotas." (Augusto Cury)

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo da dinâmica do ganho de EDFAs, primeiro com um breve

estudo teórico de Amplificação Óptica, e através de simulações numéricas com o uso do

software Optisystem e resultados experimentais. São apresentados os efeitos transientes nos

sinais na saída do EDFA, resultantes de retirada/adição de canais na entrada do amplificador.

A técnica de estabilização do ganho por realimentação toda óptica (lasing), é aplicada para

sistema WDM de até 4 canais. Os resultados obtidos colocam em evidência importância de

considerar os fenômenos transientes em projetos com cenários de Add/Drop de canais, ou

melhor em redes WDM -EDFA, assim como também a efetividade da técnica de controle de

transientes de potência lasing.

Palavras-chave: EDFA, Transientes, WDM, Controle de Ganho, Realimentação óptica.

6

Abstract

This work shows a study of EDFA's gain dynamics, first a briefly study of Optical Amplification with EDFA, after results using numerical simulations modeled in software (OptiSystem) and experimental setups. It's presented the transient effects of the output signals of EDFA, resulted of the add/drop of the channel of the input of the amplifier. The technique of gain control with feedback ,all optical (*lasing*) is applied for WDM systems at least 4 channels. The results achieved spot the importance in consider the transient phenomenon in projects there are setups of add/drop of channels, or in WDM-EDFA networks, furthermore the efficiency and effective of the *lasing* technique of transients of potency gain control.

Keywords - EDFA, Transients, WDM, Gain Control, Optic feedback

Sumário

Conteúdo

1	Int	trodu	ção	13
2	An	nplific	eador a fibra Dopada a Érbio	17
	2.1	Intr	odução	17
	2.2	Con	figuração Básica	18
	2.3	Med	canismo de Amplificação do EDFA	19
	2.4	Apl	icações do Amplificador em sistema óptico	21
	2.4	.1	Amplificador de Potência	22
	2.4	.2	Pré Amplificador	22
	2.4	.3	Amplificador de Linha	2 3
	2.5	Con	figurações do EDFA	24
	2.6	Mo	delo Matemático Espectral e Temporal do EDFA (Modelo de Giles [36])	27
	2.7	Téc	nicas de Controle de Transiente.	31
	2.7	'.1	- Controle da Potência de Bombeio	32
	2.7	.2	Controle de Enlace (link control)	33
	2.7	'.3	Controle por Emissão por Laser (Lasing)	34
	2.8	Con	clusões	40
3	Est	tudo	da dinâmica do ganho de EDFAs através de simulações em computador	41
	3.1	Intr	odução	41
	3.2	Estu	ıdo de Casos	41
	3.2	2.1	Arranjo do EDFA com um canal modulado na entrada (Configuração simulada I)	44
	3.2 (Co		. Arranjo do EDFA com um canal modulado e um canal sobrevivente na entrada ração Simulada II)	49
	3.2	2.3	Arranjo com adição e retirada (ADD/DROP) de Canais (Configuração Simulada III	I)51
	3.2 (Co		. Arranjo do EDFA com controle de ganho todo óptica por realimentação (<i>lasing</i>) ração Simula IV)	57
	3.3	Con	clusões	60
4	Est	tudo l	Experimental da Dinâmica de ganho do EDFA	61
	4.1	Con	figuração Experimental I	62
	4.1	.1	Resultados	62

	4.2	Configuração Experimental II	. 66
	4.3	Configuração Experimental III	. 67
	4.3.	1 Resultados para Configuração Experimental III	. 68
	4.4	Configuração Experimental IV	. 71
	4.4.	1 Resultados para configuração experimental IV	. 73
5	Cor	ıclusões	. 76
6	Bib	liografia	. 78
7	Ane	exos	. 84
	7.1	Conjunto EDFA – Kit OptoSci	. 84
	7.2	WDM- Multiplexer - Demultiplexer - AC Photonics	. 86

Lista de Figuras

Figura 1- Configuração Básica de um sistema de amplificação EDFA	19
Figura 2- Modelo do EDFA baseado em sistema de amplificação de três níveis	21
Figura 3- Configuração de amplificador de potência (Booster)	22
Figura 4- Configuração do Pré Amplificador	23
Figura 5- Configuração de Amplificador de Linha	23
Figura 6- Gráfico do Ganho do EDFA em função da Potência de Entrada (Medido no EDFA M5	
da MetroGain)	24
Figura 7- Configuração do EDFA com bombeio co-propagante	
Figura 8- Configuração do EDFA com bombeio contra-propagante	
Figura 9- Configuração do EDFA com bombeio bidirecional	
Figura 10- Esquema de um EDFA com realimentação reversa para técnica de controle de potênc	
bombeio	
Figura 11- Esquema de um EDFA com controle de transientes com uso da técnica de controle de enlace (link control)	e
Figura 12- Esquema de um EDFA com controle de transientes com uso da técnica de <i>Lasing/</i> Ri	
Laser	-
Figura 13- Variação de potência do canal sobrevivente com uso da técnica de controle de ganho	
realimentação óptica (ring laser), com canal de controle (ou de realimentação) em 1536 nm [52]	
Figura 14- Parâmetros de Configuração do EDFA no Optsystem.	
Figura 15- Gráfico da seção de Choque de Emissão e Absorção do EDFA fornecido pelo fabrica	
(fonte Metro Gain M5/980)	
Figura 16- Tela configuração do <i>Optisystem</i> para parâmetros da seção de choque e absorção do l	
Figura 17- Tela da configuração dos parâmetros gerais de processamento do <i>Optisystem</i> para o	
cenários simulados	44
Figura 18- Configuração Simulada I	
Figura 19 – Excursão Temporal do canal 28 para diferentes níveis de bombeio (Simulação I cena	
1 Igura 17 Executiva Temporar de canar 20 para diferences invers de comoció (cimalação 1 cent	
Figura 20 – Excursão Temporal do canal 28 para diferentes níveis de bombeio (Simulação I cena	
b)	
Figura 21– Configuração Simulada II (uma canal modulado e um canal sobrevivente)	
Figura 22 – Potência do sinal na saída do EFDA para um canal modulado (ch. 28) e um canal	43
sobrevivente (23)	50
Figura 23 – Configuração para simulação III.	
Figura 24 – Gráficos de variação de potência do canal 23 com <i>ADD/DROP</i> de canais para cenár a	
Figura 25 – Gráficos de variação de potência do canal 28 com <i>ADD/DROP</i> de canais para cenár	
Figura 26 – Gráficos de variação de potência do canal 23 com <i>ADD/DROP</i> de canais para caso	
Figura 27 – Gráficos de variação de potência do canal 28 com <i>ADD/DROP</i> de canais para caso	<i>3</i> b. 56

Figura 28 – Configuração <i>OptiSystem</i> controle de ganho com realimentação toda óptica (<i>lasing</i>) –	
Simulação IV	58
Figura 29 – Análise dos Canais 28(a) e 23(b) com Atenuador em 0.5 dB	59
Figura 30 – Análise dos Canais 28(a) e 23(b) com Atenuador em 10 dB	60
Figura 31 — Análise dos Canais 28(a) e 23(b) com Atenuador em 11 dB	60
Figura 32 – Análise dos Canais 28(a) e 23(b) com Atenuador em 15 dB	60
Figura 33 – Configuração Experimental I	62
Figura 34 – Excursão Temporal do canal 28 com potência de bombeio fixa com diferentes valores	do
sinal de entrada (Configuração Experimental I cenário a)	63
Figura 35 – Gráfico do Ganho em função da potência de entrada (Configuração Experimental I	
cenário a)	63
Figura 36 – Gráfico do Ganho em função da potência de entrada (Configuração Experimental I	
cenário b)	64
Figura 37 – Gráfico do Ganho em função da potência de entrada (Configuração Experimental I	
cenário b)	64
Figura 38 – Configuração Experimental II	66
Figura 39 – Potência do sinal na saída do EFDA para um canal modulado (ch. 28) e um canal	
sobrevivente (23) – Configuração Experimental II.	67
Figura 40 – Configuração Experimental III.	68
Figura 41 – Gráficos de variação de potência do canal 23 com <i>ADD/DROP</i> de canais para	
Experimento III caso a.	69
Figura 42 – Gráficos de variação de potência do canal 28 com <i>ADD/DROP</i> de canais para	
Experimento III caso a.	70
Figura 43 – Gráficos de variação de potência do canal 23 com <i>ADD/DROP</i> de canais para	
Experimento III caso b.	70
Figura 44 – Gráficos de variação de potência do canal 28 com <i>ADD/DROP</i> de canais para	
Experimento III caso b.	
Figura 45 – Configuração Experimental IV	72
Figura 46 – Análise temporal das excursões de potência do canal 28(b) e do canal 23(a) –	
Configuração Experimental IV – Atenuação 1 (ATN 1).	73
Figura 47 - Análise temporal das excursões de potência do canal 28(b) e do canal 23(a) -	
Configuração Experimental IV – Atenuação 2 (ATN2).	73
Figura 48 Análise temporal das excursões de potência do canal 28(b) e do canal 23(a) -	
Configuração Experimental—IV-Atenuação 3 (ATN3).	74

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros Principais da fibra dopada a Érbio M5
Tabela 2 – Ganho dos sinais para as diferentes potências de entrada da Simulação I cenário a 46
Tabela 3 – Ganho para diferentes bombeio com potência de entrada do canal 28 em -15 dBm (Simulação I- cenário b)
Tabela 4 – Ganho dos canais para o configuração simulada II
Tabela 5 – Canais utilizados no Setup
Tabela 6 – Canais na entrada do EDFA com <i>ADD/DROP</i> mantendo potência constante na entrada do EDFA
Tabela 7 – Canais na entrada do EDFA com <i>ADD/DROP</i> mantendo potência com valores constantes (dentro de uma dada variação) na entrada do EDFA
Tabela 8 - Valores de ajustes de Atenuação com o VOA para o canal de <i>Lasing</i> 24 – Configuração para Experimental

1 Introdução

No mundo globalizado em, que vivemos hoje, a informação é um dos bens ou ativos mais valiosos para a sociedade. Hoje qualquer atividade cotidiana, como trabalhar, estudar ou se divertir está associada a estar "conectado", pois, nestas diferentes ações, quase sempre, haverá a necessidade de transmitir ou receber informações. Obviamente, toda essa voracidade por comunicação e, por consequência, por banda cada vez maior por parte dos usuários (≈1 Tbps [1]) foi fortemente influenciada pela explosão do uso da Internet, no primeiro momento por emails e aplicações Web e recentemente um crescimento significativo de transmissão de vídeo e uso de computação na nuvem (*Cloud Aplications*) [2].

Todo este processo também é refletido nos investimentos em pesquisa e nos produtos e serviços na área de Tecnologia da Informação e Telecomunicações (TIC). Sendo ainda hoje, a fibra óptica, o meio físico de transporte de informação, mais adequado para acompanhar toda a demanda existente [3]. É o meio que representa os maiores saltos em capacidade de transmissão, se no inicio do uso massivo das fibras na década de 70 o sistema tinha capacidade em torno de 100 Mbps já perto do ano 2000 chegava a 1 Tb/s. [4].

Outro fator determinante, para o uso e o crescimento das redes de fibra óptica, foi utilizar sua capacidade de transmitir vários canais, com comprimentos de onda diferentes, sendo cada canal associado a um comprimento de onda distinto. Esta rede de transmissão é conhecida como rede óptica multiplexada em comprimento de onda (WDM: *Wavelenght Division Multiplexed*), [5]. As redes WDM atualmente não são projetadas apenas para os enlaces de longa distância (*backbones*), mas também já são utilizadas em redes locais, metropolitanas e de acesso. [6]

Associado as redes WDM, um grande impulso para as redes ópticas veio com o advento da fibra óptica dopada a Érbio (EDFA)[7-13], técnica de amplificação do sinal transmitido, totalmente no domínio Óptico e que desde sua comprovação tem intenso uso comercial, que permitia a amplificação do sinal de maneira transparente sem necessidade de utilizar técnicas de amplificação que dependiam da conversão eletro-óptica (3R) tão onerosas [1]. Estes fatos fizeram com que o uso do EDFA tivesse uma maturação comercial rápida, em apenas 6 anos era largamente utilizado em enlaces terrestres e transoceânicos. O comportamento de transparência do EDFA com relação ao código e taxas a serem transmitidos, além de sua habilidade de amplificar os múltiplos comprimentos de onda das redes WDM, sua

linearidade, eficiência entre outras vantagens deste dispositivo contribuíram para sua utilização crescente. Além disso o EDFA tem como características sua ampla largura de banda e sua operação na janela de 1550, faixa utilizada na transmissão WDM, ganho considerável (40 dB), independência de polarização, baixa interferência.

O avanço das técnicas de amplificação não se refletiu apenas na questão da amplificação, com o crescente aumento de tráfego nas redes ópticas com o WDM, técnicas de gerenciamento desse tráfego também surgiram com o intuito de fazer roteamento e a comutação das transmissões no domínio óptico. (*Wavelenght Routed Nodes*).

Com o uso das redes e dispositivos para roteamento totalmente óptico, a rede óptica, assim comoa rede metálica, atinge um maior nível de capacidade de reconfiguração na rede, o que possibilitou uma manobra de adição e remoção de canais. Com este recurso há a possibilidade de haver uma variação no número de canais que se propagam pela fibra, podendo haver uma variação aleatória do número de canais em pontos distintos da rede (nós) fazendo com que a potência de entrada nos amplificadores ópticos tenham variações.

A variação de potência na entrada, associados a retirada ou adição de canais, seja por reconfigurações ou falhas na rede causa reflexos na variação de potência do EDFA, alterações que refletem no ganho do amplificador, que opera normalmente em regime de saturação. Toda esta dinâmica de comportamento do sinal no EDFA deve ser analisada cuidadosamente. Visto que essa variação de canais adicionados ou retirados, sobretudo em uma cascata de EDFA's, em uma rede óptica roteada (WRN), faz com que os EDFA's experimentem uma modulação de ganho, induzida pelo efeito de saturação cruzada [14-15]. Este efeito pode causar o surgimento de transientes de potência nos canais envolvidos na transmissão, de maneira que em função da sua duração e amplitude haja comprometimento ou severa degradação no enlace ou sistema de transmissão. A duração de transientes de um EDFA de estágio único é da ordem de centenas de microssegundos, por outro lado quando se usa uma cadeia de 10 amplificadores a duração é menor, na ordem de unidades ou dezenas de microssegundos [16-17]. No caso de crescer o número de amplificadores estes tempos são menores na proporção de 1/N, de modo que um arranjo que utilize 100 amplificadores possa ter variação de potência na ordem de 20 dB o que é inaceitável[18].

O reflexo destas variações de potência em função da adição ou retirada se refletem nos canais remanescentes do sistema, também conhecidos como sobreviventes, os penalizando de alguma forma. Quando há um ou vários canais transmitidos os canais sobreviventes experimentam um aumento de potência, que pode ultrapassar o limiar na qual os efeitos não lineares (FWM, Brillouin, Raman) sejam consideráveis [19]. Por outro lado no acréscimo de novos canais, a potência dos canais diminui, de modo que podem cair a níveis de potência que não são possíveis de serem detectados na recepção.

O adequado conhecimento da evolução temporal dos sinais do EDFA, seja em cascata, ou em um único estágio para conhecer a dinâmica e comportamento dos canais quando submetidos a variações diversas, tais como: potência, número de canais, etc., são fundamentais para o desenvolvimento de projetos de redes ópticas WDM-EDFA.

Por outro lado, outro fator importante é controlar os transientes de potência de modo que seus efeitos possam ser minimizados ou até mitigados nas excursões de potência dos canais sobreviventes. Há diversas técnicas de controle de transientes de potência implementadas, as mais conhecidas são as baseadas em controle da potência de bombeio do EDFA [20-23], controle de enlace [24], por inserção de canais de controle, e a limitação de ganho por realimentação fora da banda de operação (*lasing –Gain Clamping*). Além disso, diversas técnicas têm sido estudadas experimentalmente ou simuladas para o controle de ganho em sistemas de amplificação híbrido que envolvem EDFA e Raman. Recentemente [25] um estudo teórico apresentou uma nova técnica de controle de ganho eletrônico, com proposição de eliminar totalmente os transientes dos sinais e quando houver ADD/DROP o canal alcançar o estado estacionário em poucos milissegundos utilizando alimentação direta (*feed foward*) e alimentação reversa (*feedback*) para controle de transientes no EDFA.

O objetivo fundamental de todas as técnicas é limitar variação das excursões de potência ao menor valor possível para qualquer arranjo que se tenha na entrada do amplificador do sistema.

Com todo o cenário mostrado acima esta dissertação irá caracterizar a dinâmica do EDFA experimentalmente com um EDFA comercial e cenários que permitam a variação do número de canais, modulação de canais que simulem o efeito de ADD/DROP, além de experimento de controle de ganho totalmente óptico com a técnica de *Lasing*. Adicionalmente,

os cenários/arranjos experimentais também são simulados na plataforma *Optisystem* com características, quando possíveis, similares ao realizado em bancada.

Para apresentar os estudos e resultados alcançados o presente trabalho é organizado nos seguintes capítulos:

No Capítulo 2, um estudo da teoria do amplificador de fibra dopada com Érbio, suas configurações, modelos matemáticos no domínio espectral e temporal. Abordagens teóricas de técnicas de controle de transientes de potência e modelagens matemáticas.

No Capítulo 3, o estudo da Dinâmica de ganho do EDFA com o uso do *Optisystem*, com uma breve apresentação desta ferramenta. Os estudos de caso simulados são: um arranjo com o chaveamento de um canal no sistema WDM-EDFA; chaveamento de um canal com um canal sobrevivente; *add/drop* de vários canais (total de 4) e observação do comportamento dos canais sobreviventes (com potência por canal constante); *add/drop* de canais com potência total de entrada no EDFA constante; por último a simulação da técnica de controle por realimentação (*lasing*), com observação do canal sobrevivente e o comutado.

No Capítulo 4 é realizado o estudo experimental da dinâmica de ganho do EDFA, com os resultados das medidas experimentais de parte dos casos simulados no capítulo 3.

No Capítulo 5 são apresentadas conclusões acerca do trabalho realizado com aspectos de sucesso e limitações que foram encontradas. Por fim algumas propostas de trabalhos futuros.

2 Amplificador a fibra Dopada a Érbio.

2.1 Introdução

A pesquisa com amplificadores de fibra dopada com terras raras vem desde 1964 quando demonstrou-se o uso destes dispositivos [26]. Porém, só em 1987 ocorreu a descoberta e demonstração [27-28] do processo de amplificação óptica de fibras dopadas com Érbio. A partir daí houve um enorme estimulo para a pesquisa na tecnologia de fibras ativas na região de 1550 nm (terceira janela do espectro óptico). Este trabalho culminou com a demonstração dos amplificadores com Érbio de alto ganho [29--30], sobretudo sua aplicação em sistemas de transmissão óptica [31]. Atualmente este tipo de fibras têm aplicações em amplificadores ópticos, lasers, chaves (*switch*) ópticas e uma variedade de dispositivos não lineares [31]. Depois dos trabalhos pioneiros com lasers a fibra [26,32] a pesquisa com fibras dopadas com terras raras (EDFA's) simplesmente revolucionaram e impulsionaram os avanços nas redes de comunicação óptica (WDM) e a modalidade de amplificação óptica mais utilizada desde a década de 90 [2,4].

Além das técnicas de amplificação óptica com EDFA, há outras técnicas de amplificação óptica com vasta aplicabilidade. Com destaque para amplificação Raman e os amplificadores ópticos semicondutores, também conhecidos como SOAs (*Semiconductor Optical Amplifiers*), tecnologias inclusive que são anteriores a consolidação do EDFA. Contudo, estas tecnologias apresentam algumas desvantagens em relação ao EDFA, pois não apresentam bons resultados para o uso em redes WDM de alta capacidade. Para a Amplificação Raman, o problema é a necessidade o alto nível de bombeio necessário para alcançar valores de ganho que tem o EDFA, o que ainda hoje prejudica a viabilidade comercial. Por essa dificuldade normalmente as aplicações dos amplificadores Raman são na sua maioria complementares as fornecidas pelos EDFA's nos sistemas ópticos, modalidade conhecida como amplificação hibrida (EDFA + Raman). [33-34]. No caso dos SOA's eles normalmente são utilizados com chaves ópticas, para suas aplicações como amplificador ele tem algumas limitações: alta perda de inserção, alta figura de ruído, sensibilidade a polarização e, sobretudo uma elevada intermodulação durante a amplificação de sinais WDM [35].

O propósito deste capítulo é, em sua primeira seção, apresentar os princípios básicos de funcionamento da amplificação óptica para os EDFA's, aplicações, configurações e uma modelagem matemática temporal e espectral que servirá de base para entendimento do estudo

e que são utilizadas nos modelos numéricos do simulador (*Optisystem*). Na segunda seção do capítulo são apresentadas as abordagens teóricas das técnicas de controle de potência e sua modelagem matemática.

2.2 Configuração Básica

Os dispositivos que compõem um conjunto de amplificação óptica com fibra dopada a Érbio são: a fibra dopada a Érbio, o laser de bombeio, o acoplador WDM e os isoladores, conforme Figura 1. As características especificas de cada elemento, dependem do projeto de amplificação no qual são utilizados.

O processo de amplificação no EDFA ocorre quando a fibra dopada com érbio, após um processo de excitação dos íons de Érbio, através da energia que absorvem do bombeio, liberem energia (fótons). A fonte de energia para esta excitação é proveniente da luz dos lasers conhecidos como lasers de bombeio, que são lasers semicondutores que operam em comprimentos de onda que coincidem com as faixas espectrais de absorção do Érbio, comercialmente as faixas utilizadas são de 980 nm e 1480 nm. [7]

Os dispositivos utilizados no EDFA tem, cada um, uma função específica. O acoplador WDM é utilizado para concatenar o sinal de bombeio (980 nm) e o sinal que se deseja amplificar (15xx). Este dispositivo normalmente tem três ou quatro portas, com o objetivo de combinar com o ilustrado, os dois sinais laser injetados na sua entrada. Os acopladores podem ser de 1480/1550 nm, 980nm/1550 nm de acordo com o laser de bombeio a ser utilizado. Outro dispositivo ilustrado, na fig.1, são os isoladores, utilizados na entrada e saída do amplificador, que tem como característica sua baixa perda de inserção no sentido de propagação e alta no sentido contrário, justamente para evitar as reflexões que podem vir dos conectores de entrada e saída do amplificador para com isso mitigar instabilidades do perfil de ganho do EDFA. Além disso, quanto maior o ganho do amplificador, maior a necessidade do uso de isoladores pelo fato das reflexões nos conectores e retroespalhamento crescerem com o aumento de potência de saída do sistema de amplificação. Já a fibra dopada com Érbio é o meio ativo no qual se dá o processo de amplificação.

O ganho que proporcionará a fibra depende das características intrínsecas da fibra, tais como a concentração de érbio, abertura numérica, índice de refração, comprimento, entre outros.

Como último destaque, o laser de bombeio, dispositivo, conforme já exposto, é responsável pela excitação dos íons de érbio e faz com que o meio ativo (EDF), proporcione o ganho na região de 1550 nm.

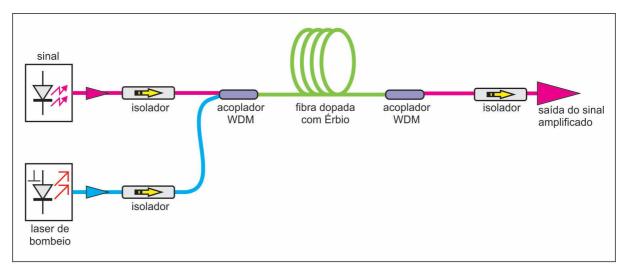


Figura 1- Configuração Básica de um sistema de amplificação EDFA

2.3 Mecanismo de Amplificação do EDFA

Como visto anteriormente o EDFA necessita para amplificação de sinais na faixa de 15xx de um processo de excitação que é feito com laser de bombeio. Uma abordagem para o entendimento do processo de amplificação do EDFA é através do modelo de níveis de energia, no caso da Figura 2 é mostrado uma modelagem com três níveis.

Na fibra dopada com Érbio quando temos a inserção dos sinais ópticos, alguns fenômenos ocorrem, tais como absorção ou emissão (estimulada ou espontânea)

Com o diagrama de três níveis de Energia (N1, N2 e N3) e um bombeio de 980 nm, o nível 1 é conhecido com nível básico ou fundamental e tem um nível de população de Er³+ N1 (íons/m³), o nível 2 é conhecido como nível metaestável e tem uma densidade de população Er³ N2 (íons/m³) e por fim o nível 3, denominado nível superior ou de bombeio, com densidade de população Er³ N3 (íons/m³). Em condições de equilíbrio, sem a presença de bombeio, as populações N 1> N2 e N2> N3. Esta situação como explicado a seguir é alterada com o bombeio em função da inversão de população, quando ocorre a transição de íons de érbio passarem do nível 1 para o 3.

Para o caso ilustrado, com bombeio de 980 nm, a absorção dos fótons pelo meio ativo, faz com que preferencialmente os íons de érbio do nível básico sejam excitados e levados para o nível de bombeio. Os íons que chegam ao nível de bombeio permanecem ali por um curto período de tempo (1 µs), e os portadores excitados tendem cair direta ou indiretamente para o nível fundamental. Contudo mesmo com os decaimentos diretos, a maior parte dos portadores decaem espontaneamente para o nível metastável, através de transições não radioativas. No nível metastável, quando a população de portadores superar a população do nível fundamental, dá-se o processo de inversão de população que é base para amplificação óptica do sinal. Esta transição do nível metaestável para o básico é radioativa, logo, os portadores perdem energia através da emissão de fótons estimulados ou espontâneos na região de 1550 nm.

Quando inserimos um sinal na faixa de 15xx neste meio ativo do EDFA, este pode estimular fótons em coerência de fase, direção, polarização, comprimento de onda provocando um processo cumulativo e em consequência a amplificação do sinal da entrada do amplificador. No entanto os fótons também podem ser emitidos por decaimentos espontâneos do nível metaestável para o básico com características de fase, comprimento de onda, direção e polarização aleatórios. Com esta situação os fótons espontâneos assim como os estimulados, são capazes de estimular o surgimento de outros fótons, e da mesma forma estes serem amplificados. Os fótons gerados pela emissão espontânea não são desejáveis e por isso são considerados ruídos no processo de amplificação. Este processo de amplificação indesejada do ruído é conhecido com emissão espontânea amplificada (ASE - *Amplified Spontaneous Emission*), que caracteriza uma importante fonte de ruído nos sistemas de transmissão óptica que utilizam EDFA [7].

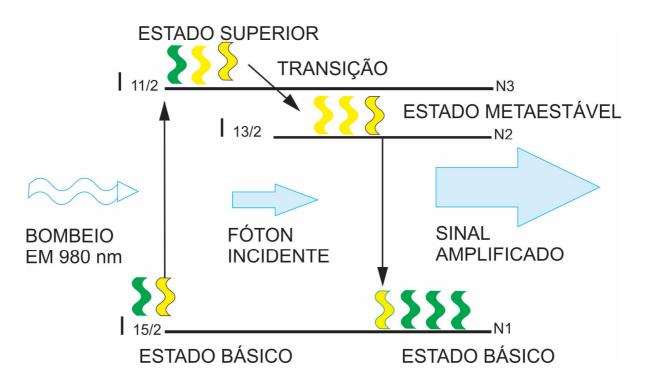


Figura 2- Modelo do EDFA baseado em sistema de amplificação de três níveis

2.4 Aplicações do Amplificador em sistema óptico

As aplicações para o EDFA são normalmente de três tipos, de acordo com as funções e posicionamento do amplificador ao longo de um enlace de sistema óptico. Dentre os tipos utilizados tem-se: o amplificador de potência, o amplificador de linha e o pré amplificador.

O EDFA tem seu ganho com forte dependência dos vários parâmetros que influenciam seu ganho, tais como visto anteriormente, como: tamanho do EDF, laser de bombeio, entre outros. No gráfico exposto na fig.6 tem-se a curva obtido do Ganho do EDFA em função do valor da potência de entrada. Com base nele pode-se observar os valores de ganho obtido para região de pequenos sinais (entre -35 a -20 dBm) e para os valores de potência de entrada maiores, no qual observa que não se alcança ganhos menores que no caso anterior, em outras palavras o EDFA opera na região de saturação.Esta análise fundamenta e auxilia no entendimento das aplicações dos amplificadores que se seguem.

2.4.1 Amplificador de Potência

O amplificador de potência, também conhecido com *booster*, conforme Figura 3, ficam localizados na saída dos transmissores e tem como papel a amplificação do sinal de entrada na fibra (enlace). Neste esquema de amplificação o foco é a potência de saída. Em função da amplificação conseguida no sinal é que se define a posição do receptor ou de mais um amplificador ao longo do enlace. Contudo deve ser observado o limite de potência a partir do qual surjam efeitos não lineares que causem degradação no sinal que trazem penalidades para o sistema de transmissão.

Normalmente, os *booster* operam com sinais de entrada na ordem de 0 dBm, região na qual o EDFA trabalha na zona de saturação de ganho, ou seja, tem ganho menor em relação a região de pequenos sinais. Por outro lado como característica de trabalharem na região de saturação, os amplificadores nessa condição possuem baixo nível de ASE, já que o sinal de entrada é alto o que faz com que haja também menos ganho para emissão espontânea.

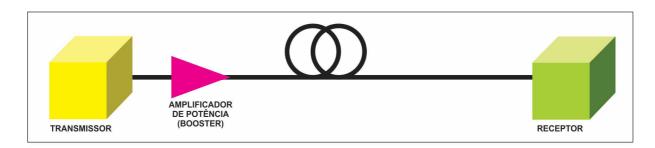


Figura 3- Configuração de amplificador de potência (Booster)

2.4.2 Pré Amplificador

Nesta aplicação de amplificador o EDFA tem como característica fundamental e benéfica para o processo de recepção a baixa perda de inserção de ruído ao sinal transmitido. O amplificador é posicionado, conforme a Figura 3, na frente no enlace óptico, antes do receptor óptico, com um intuito de aumentar a sensibilidade do mesmo. Os pré amplificadores trabalham na região linear da curva de ganho do EDFA, ou seja, na região de pequenos sinais. Logo, nesta aplicação o parâmetro de projeto relevante é a Figura de ruído, pois, trabalha-se com sinais e baixa potência com o interesse de obter um maior ganho e menor ASE possíveis.

Por operar na região de pequenos sinais, temos alto ganho do sinal, mas as potências são baixas comparado com as potências dos amplificadores de potência, com sinais de entrada na ordem de 0 dBm e saída em torno de 15 dBm, já os pré tem sinais na ordem -40 dBm na entrada e saída, baseado na curva do EDFA (Figura 6) de 0 dBm. Desta forma esta aplicação também tem maior nível de ASE do que o *booster*.

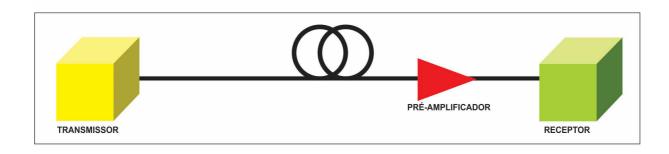


Figura 4- Configuração do Pré Amplificador

2.4.3 Amplificador de Linha

Na aplicação do EDFA, fig.5, o objetivo é ter amplificadores de baixo ruído e que tem a finalidade de compensar as perdas com atenuação do sinal ao longo da propagação do mesmo ao longo do enlace óptico. Estes amplificadores são projetados para terem um ganho alto, de maneira a permitir o maior nível de espaçamento entre ele. No entanto, deve ser obervado o nível da Figura de ruído, que deve ser baixa para que não ocorra o acumulo de ASE ao longo do sistema óptico e pode significar um problema na qualidade do sinal recebido. O ganho dos amplificadores de linha e potência de saída que se consegue com eles, fica entre os *booster* e os pré-amplificadores, já os sinais de entrada ficam em torno de -20 dBm.



Figura 5- Configuração de Amplificador de Linha

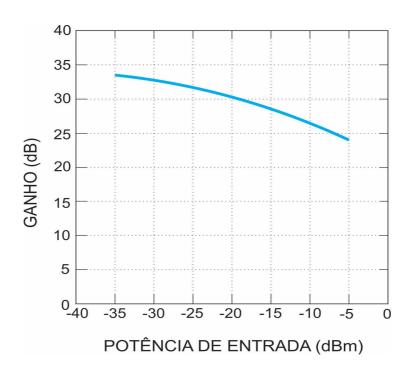


Figura 6- Gráfico do Ganho do EDFA em função da Potência de Entrada (Medido no EDFA M5/980 da MetroGain)

2.5 Configurações do EDFA

As configurações do EDFA normalmente se diferem em função do posicionamento do laser de bombeio em relação ao sinal de entrada no sistema de amplificação. Estas configurações são conhecidas como co-propagante, contra-propagante e bidirecional.

A Figura 6, ilustra uma configuração com o bombeio ocorrendo no sentido de propagação do sinal, ou seja, configuração com laser de bombeio co-propagante. Uma aplicação para esta configuração seria com amplificador de linha ou dependo do caso amplificador de linha, visto que apresenta baixa figura de ruído.

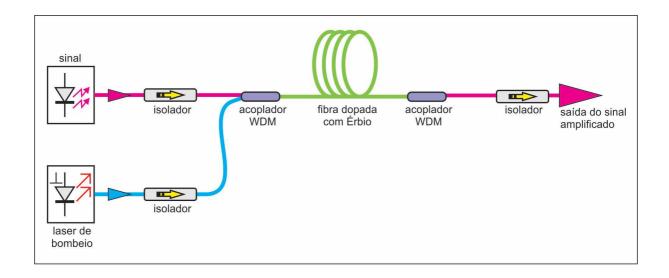


Figura 7- Configuração do EDFA com bombeio co-propagante

Na Figura 7, ilustra-se o caso com bombeio contra-propagante, no qual o laser de bombeio é posicionado na saída fibra de érbio, ou seja, o sinal de bombeio é acoplado no sentido contrário de propagação do sinal a ser amplificado. Esta configuração é máxima a potência na saída do amplificador em função da maior concentração do bombeio na saída da fibra dopada. Logo esta é uma configuração recomendada para uso em amplificadores de potência.

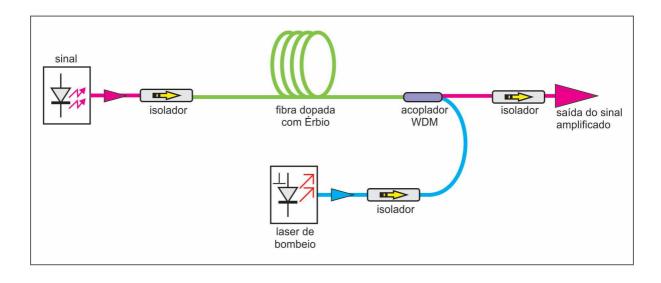


Figura 8- Configuração do EDFA com bombeio contra-propagante

Outra configuração citada é a bidirecional, conforme fig.8, ela tem as duas configurações de bombeio citadas, ou seja, no sentido co e contra-propagante. Para montagem

de um sistema com esta configuração conforme ilustrada na Figura 8, são necessários dois acopladores "WDM", um para cada laser de bombeio, localizados nas extremidades da fibra dopada. Pode ser utilizado um único laser de bombeio, através da divisão do sinal do mesmo por um dispositivo óptico para divisão de potência, conhecido como *Splitter* Óptico, com a interligação da saída do dispositivo as extremidades da fibra de Érbio e a potência pode ser controlada ou ajustada com o uso de um atenuador variável. Um amplificador com a configuração bidirecional tem, normalmente, alto ganho e alta potência de saída, fato que o habilita para aplicações com o amplificador de potência ou de linha.

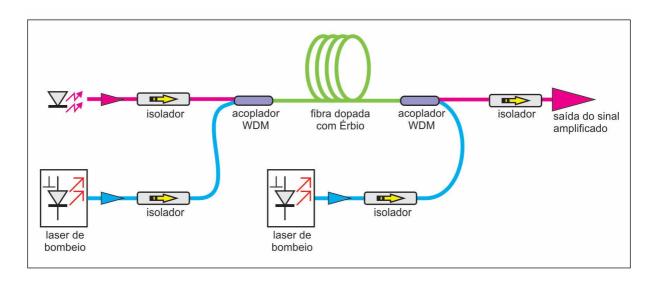


Figura 9- Configuração do EDFA com bombeio bidirecional

Das configurações e aplicações citados, idealmente há a busca por amplificadores que tenham alto ganho, de modo a ter-se a possibilidade do uso de enlaces com dispositivos cada vez mais espaçados, ou seja enlace de longas distâncias, e com baixas figuras de ruído.

A busca é por ter um amplificador ideal, fato que não é conseguido isoladamente por uma única configuração. Com isto, a forma de buscar atender aos requisitos para ficar mais perto do ideal é o uso em conjunto das características de cada configuração mostrada. A maneira de se fazer isso é já citada na introdução, é o uso de múltiplos estágios de amplificação com EDFA também conhecido como Cascata de EDFA´s.

Com o uso de cascata é possível controlar melhor a questão da ASE em um estágio, o ganho no outro, o controle de potência, enfim pode ser trabalho as características pertinentes a cada estagio de maneira segmentada ou em conjunto. Deste modo, o projeto buscará ter o

compromisso de garantir o melhor nível do sinal recebido, que possibilite ele estar sem problemas com efeitos não lineares e com níveis bons de sensibilização do receptor, para que não sofram as penalidades de potência, que em um caso ou no outro, podem comprometer a informação transmitida.

O controle da ASE de um estágio para outro é feito com o uso de filtro, sintonizado no comprimento de onda do sinal, de modo a ter uma redução da ASE, de modo que o sinal tenha um ganho maior no estágio seguinte em função do menor acoplamento da ASE. Existem várias soluções de filtragem e controles de ganho e configurações de para amplificadores em cascata [18]

2.6 Modelo Matemático Espectral e Temporal do EDFA (Modelo de Giles [36])

O modelo dinâmico apresentado é o mesmo utilizado como base para os modelos computacionais das simulações do *Optsytem*. A modelagem busca refletir os comportamentos da evolução temporal e de potência dos sinais e da bomba no EDFA. Sobretudo com interesse de observar o comportamento dos sinais em cenários de retirada e adição de canais para observar a questão dos transientes de potência no canal, que serão simulados e verificados experimentalmente em diversas configurações neste trabalho. O modelo utilizado equações de taxa e propagação.

A abordagem para o modelo é de dois níveis, desta forma, é desprezado a população do nível de superior (ou de bombeio), considerando ainda que os elétrons deste nível decaem espontaneamente e não radiotivamente para o nível metaestável. Observa-se que o tempo de vida no nível N3 é da ordem de 1 μs (T₃₂) que é muito menor que o tempo de vida em N2 que é da ordem de 10 ms (T₂₁). Além disso, o ruído ASE também é desconsiderado, pois, quando trabalha em zona de saturação e com níveis de ganho inferiores a 20 dB, a ASE é desprezível em comparação com a potência dos sinais transmitidos [37].

As equações de taxa e propagação, conforme [38] que descrevem a variações de potência dos sinais transmitidos e do laser de bombeio em função do tempo e distância são:

$$\frac{\partial P_i(z,t)}{\partial t} + \nu \frac{\partial P_i(z,t)}{\partial z} = \nu \Gamma_i [\sigma_{ei} N_2(z,t) - \sigma_{ai} N_1(z,t)] P_i(z,t)$$
 (Eq. 1)

$$\frac{\partial P_p(z,t)}{\partial t} + \nu \frac{\partial P_p(z,t)}{\partial z} = \nu \Gamma_p \left[\sigma_{ap} N_1(z,t) \right] P_p(z,t)$$
 (Eq. 2)

Onde:

 $P_i(z,t)$ representa a potência do sinal em função da posição e tempo;

 $P_{p}(z,t)$ representa a potência da bomba em função da posição e tempo;

v – velocidade de propagação dos sinais na fibra dopada;

 $\Gamma_{i,p}$ – fato de superposição dos sinais (i) e da bomba (p);

 σ_{ei} – seção de choque de emissão do EDF para os sinais;

 $\sigma_{ai,ap}$ – seção de choque de absorção do sinal (i) e da bomba (p)

Como a velocidade de propagação da luz é da ordem de 3. $10^8\,\text{m/s}\,$ o tempo de trânsito ao longo de uma fibra de érbio, com a usada nos experimentos deste trabalho, que é de 12,5 m, é de 0,04µs, tempo muito menor do que normalmente ocorrem as excursões de potência dos canais em situações de adição e retirada que são da ordem de 0,1 ms. Com isto pode ser desconsiderado o termo da variação temporal das equações anteriores e considerando N_T , como a densidade de população total de íons de érbio Er^{3+} , conforme principio de conservação de energia - $N_{T=}N_1$ + N_2 , elas ficam reescritas assim:

$$\frac{\partial P_i(z,t)}{\partial z} = \Gamma_i [(\sigma_{ei} + \sigma_{ai}) N_2(z,t) - \sigma_{ai} N_T(z,t)] P_i(z,t)$$
 (Eq. 3)

$$\frac{\partial P_p(z,t)}{\partial z} = -\Gamma_p \sigma_{ap} \left[N_2(z,t) - N_T(z,t) \right] P_p(z,t)$$
 (Eq.4)

A obtenção de N₂ é determinada conforme a equação de taxa:

$$\frac{\partial N_2(z,t)}{\partial t} = \sum_i \frac{\sigma_{ai} \Gamma_i}{h \nu_i A} N_1(z,t) P_i(z,t) + \frac{\sigma_{ap} \Gamma_p}{h \nu_p A} N_1(z,t) P_p(z,t) - \sum_i \frac{\sigma_{ei} \Gamma_i}{h \nu_i A} N_2(z,t) P_i(z,t) - \frac{N_2(z,t)}{\tau}$$
(Eq.5)

Onde os parâmetros A representa a área efetiva da fibra de érbio; h a constante de Planck e $v_{i,p}$, a frequência do sinal transmitido (i) e da bomba (p). Na Eq. 5, o primeiro e segundo termo após a igualdade representa a absorção de energia do nível metaestável com relação aos sinais injetados (i) com informação e o da bomba (p); o último termo representa a emissão de fótons coerentes com os sinais a serem transmitidos na fibra e o decaimento não radioativos dos íons de érbio para o nível fundamental, que é função do tempo de vida dos portadores (τ). A equação de taxa (Eq. 5) pode ser ainda reescrita, considerando - $N_{T} = N_{1} + N_{2}$, que resulta em:

$$\frac{\partial N_{2}(z,t)}{\partial t} = \sum_{i} \frac{P_{i}(z,t)}{h\nu_{i}A} \Gamma_{i} [(\sigma_{ai} + \sigma_{ei})N_{2}(z,t) - \sigma_{ai}N_{T}] + \frac{P_{p}(z,t)}{h\nu_{p}A} \Gamma_{p}\sigma_{ei} [N_{T} - N_{2}(z,t)] - \frac{N_{2}(z,t)}{\tau}$$
(Eq. 6)

A equação de taxa reescrita (Eq..6) desta forma, tem nos três termos as contribuições do sinal transmitido (ou de informação), do sinal de bombeio e do decaimento não radioativo dos íons de érbio para o nível básico.

Substituindo as Eq. 3 e Eq.4 nesta equação simplificada (Eq..6), se contabiliza a variação temporal da densidade de população de íons de érbio no nível metaestável (N2) em função de derivadas no domínio espacial das potências de entrada dos sinais transmitidos e o do sinal de bombeio, tendo então:

$$\frac{\partial N_2(z,t)}{\partial t} = -\sum_i \frac{1}{h\nu_i A} \frac{\partial P_i(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{h\nu_p A} \frac{\partial P_p(z,t)}{\partial z} - \frac{N_2(z,t)}{\tau}$$
(Eq..7)

Contudo para resolver as Eq.3 e Eq. 4, faz-se a integração em função da posição (z), que resulta em:

$$P_{i,out}(t) = P_{i,in}(t) \exp\left[\Gamma_i (\sigma_{ai} + \sigma_{ei}) \mathcal{N}(t) - \Gamma_s \sigma_{ai} N_T L \right]$$
 (Eq..8)

$$P_{p,out}(t) = P_{p,in}(t) \exp\{-\Gamma_i \sigma_{ap} \left[N_T L - \mathcal{N}(t) \right]$$
 (Eq..9)

$$\mathcal{N}(t) = \int_0^L N_2(z, t) dz$$
 (Eq..10)

Onde $\mathcal{N}(t)$ é representa a concentração de íons de érbio por unidade de área (íons/m²), ao longo de uma fibra de comprimento L. Pode se obter este parâmetro com a integração da Eq. 7, conforme se

$$\frac{\partial \mathcal{N}(t)}{\partial t} = -\sum_{i} \frac{P_{i,out}(t) - P_{i,in}(t)}{h\nu_{i}A} - \frac{P_{p,out}(t) - P_{p,in}(t)}{h\nu_{p}A} - \frac{N_{2}(z,t)}{\tau}$$
(Eq..11)

Considerando agora uma população de íons normalizadas do nível metaestável como:

$$\rho(t) = \frac{\mathcal{N}(t)}{N_{T}L} \tag{Eq..12}$$

Adicionalmente, pegando os parâmetros segundo Giles et AL [36], que é o modelo que é usado como base para as simulações do *Optisystem* (seção seguinte), as relações de atenuação do sinal de informação (a_i) e do bombeio (a_p) e também os seus fatores de absorção $(\sigma_{ai}$, σ_{ap}), tem-se:

$$\alpha_i = \Gamma_i \sigma_{ai} N_T \tag{Eq..13}$$

$$\alpha_p = \Gamma_p \sigma_{ap} N_T \tag{Eq..14}$$

$$g_i = \Gamma_i \sigma_{ei} N_T$$
 (Eq..15)

Desta forma com base nas equações (Eq.13, Eq.14, Eq.15), as Eq.8, Eq.9 e Eq.12 (variação temporal de ρ), ficam expressas como se segue (Eq.16, Eq.17 e Eq.18):

$$P_{i.out}(t) = P_{i.in}(t) \exp[(g_i + \alpha_i)L\rho(t) - \alpha_i L]$$
 (Eq.16)

$$P_{p,out}(t) = P_{p,in}(t) \exp[-\alpha_p L(1 - \rho(t))]$$
 (Eq.17)

$$\frac{d\rho(t)}{dt} = -\sum_{i} \frac{P_{i,in}(t)}{h\nu_{i}AN_{T}L} \{ \exp[(g_{i} + \alpha_{i})L\rho(t) - \alpha_{i}L] - 1\} - \frac{P_{p,in}(t)}{h\nu_{p}AN_{T}L} \{ \exp[-\alpha_{p}(1 - \rho(t))L] - 1\} - \frac{\rho(t)}{\tau}$$
(Eq..18)

Considerando o fator de saturação de ganho (ξ) com a relação da área efetiva da fibra, da concentração total de íon s de érbio e o tempo de vida dos portadores, tem-segundo [7], a seguinte equação:

$$\xi = \frac{AN_T}{\tau} \tag{Eq..19}$$

Substituindo a Eq. 19 na Eq. 18, resulta em:

$$\frac{d\rho(t)}{dt} = -\sum_{i} \frac{P_{i,in}(t)}{h\nu_{i}\xi\tau L} \{ \exp[(g_{i} + \alpha_{i})L\rho(t) - \alpha_{i}L] - 1\} - \frac{P_{p,in}(t)}{h\nu_{p}\xi\tau L} \{ \exp[-\alpha_{p}(1 - \rho(t))L] - 1\} - \frac{\rho(t)}{\tau}$$
 (Eq..20)

Desta maneira, através das Eq.17, Eq.18 e Eq.20, tem-se o modelo dinâmico do EDFA. Esta modelagem permite prever o comportamento dos canais transmitidos e do bombeio no domínio temporal. Para tanto é necessário ter os parâmetros das equações, através de dados do fabricante ou mediante a caracterização do EDFA [39]. Para ter os resultados das excursões temporais de potência dos canais ao longo do EDFA, deve-se utilizar algum método de resolução numérica, tal como o Runge Kutta, o qual é base em vários modelos de simulação.

2.7 Técnicas de Controle de Transiente.

Como já citado na introdução, a adição e retirada de Canais (*Add/Drop*), ocasionam os chamados transientes de potência nos canais, tal situação que ocorre devido a diversas reconfigurações nas redes, falhas e outras, são criticas para as transmissões multicanais-WDM-e podem trazer serias penalidades ao sistema óptico, tal como a degradação da BER, dar origem a efeitos não lineares, etc. Desta forma, o ganho do sistema de Amplificação do EDFA deve ser o mais estável possível, para que seja evitado grande variações no ganho, ou seja, na potência dos canais "sobreviventes", para que as variações de potência na entrada do amplificador devido a esse mudança de canais (*ADD/DROP*) não comprometam as

informações transmitidas ao longo desta rede óptica. Para controlar ou mitigar esses efeitos, diversas técnicas e modelos tem sido pesquisados e demonstrados experimentalmente, tais como: os baseados em controle de potência de bombeio [20-21;40-41], controle de enlace [24] e técnica de realimentação laser (*lasing* ou *ring* laser). [42-44]

As técnicas são classificadas em totalmente ópticas (lasing), eletrônicas (controle bombeio) ou hibridas (controle de bombeio junto com *ring* laser).

Nesta seção são mostrados o esquema e uma modelagem para os controles que usam as técnicas de controle de bombeio, realimentação seletiva e *lasing*.

2.7.1 - Controle da Potência de Bombeio

Essa é umas principais técnicas de controle dos transientes, ela é baseada no controle da potência de bombeio com uso de um circuito optoeletrônico de alimentação direta (*feed foward*) [20,22, 45] ou reversa (*feedback*) [23,46]. O tempo de resposta desta técnica depende fortemente do tempo de resposta do circuito eletrônico, de modo a atuar de maneira adequada quando da variação do número de canais na entrada do amplificador (*ADD/DROP*).

O esquema básico deste método é descrito conforme Figura 10, onde observamos um esquema de amplificação com EDFA com realimentação reversa de modo a fazer o ajuste da potência de bombeio [23]

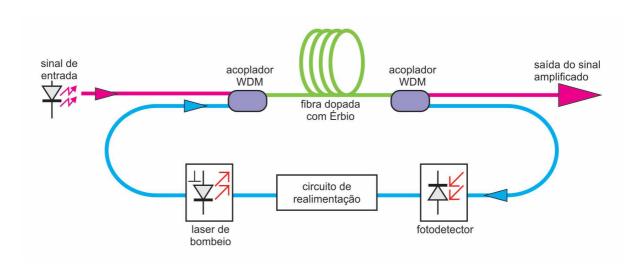


Figura 10- Esquema de um EDFA com realimentação reversa para técnica de controle de potência de bombeio

A modelagem matemática deste, na qual o controle da potência de bombeio é feito pela variação da potência na saída de um canal adicional de controle temos a equação abaixo, que deve ser adicionada ao modelo dinâmico (apresentando anteriormente), para descrever a realimentação [23]:

$$\frac{dP_p^L(t)}{dt} + \frac{P_p^L(t) - P_p^L(0)}{T_f} = -\frac{G_f[P_{SC}^L(t) - P_{SC}^L(0)]}{T_f}$$
 (Eq.21)

Onde Pp e Psc representam respectivamente, a potência de bombeio direta na entrada do amplificador e a potência do sinal de controle na saída do amplificador; L como no modelo dinâmico, representa o comprimento da fibra de érbio; o ganho de conversão, ele é definido como a razão entre a potência de bombeio e a variação da potência do sinal de controle; o tempo de resposta do circuito de realimentação.

2.7.2 Controle de Enlace (link control)

Esta técnica de controle de transientes, conhecida com controle de enlace ou link control, desenvolvida originalmente pelo grupo da Bell Laboratories e ATT Research [24], consiste na introdução de um canal de controle, o qual tem sua potência continuamente ajustada, de maneira que o amplificador (ou amplificadores) e os canais no sistema de transmissão óptico que atuem sejam protegidos contra o efeito dos transientes originados pelo ADD/DROP de canais.

A Figura abaixo mostra o esquema do funcionamento do controle de enlace [24]. O termo enlace está ligado ao trecho entre dois nós, ou pontos de uma rede, no qual pode haver a retirada ou adição de canais (*ADD/DROP*). Conforme ilustrado na fig.11, o canal de controle é adicionado no acoplador seletivo (WSC- *Wavelength selective coupler*), antes do primeiro amplificador e é retirado na saída do último amplificador da cascata, com intuito de evitar propagar tal sinal para o próximo nó de roteamento da rede (WRN – *Wavelength Router Node*). A potência do canal de controle é ajustada de maneira continua através do circuito de realimentação, com o objetivo de manter constante a potência total da entrada do primeiro EDFA do enlace. Com isto, os sinais e amplificação deles ao longo dos amplificadores é mantida constante, mitigando desta forma os transientes de potência em função das variações de ganho.

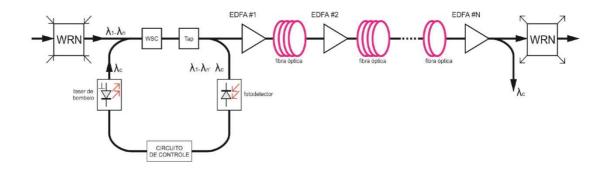


Figura 11- Esquema de um EDFA com controle de transientes com uso da técnica de controle de enlace (link control)

A modelagem numérica desta técnica que deve ser adicionada ao modelo dinâmico, para obter a comportamento das excursões temporais dos canais, segue também modelo de Mothosima [23], com a consideração do canal de controle como mais um sinal, além da introdução de uma parcela para representar o circuito de realimentação, tem-se:

$$\frac{dP_{sc}^{0}(t)}{dt} + \frac{P_{sc}^{0}(t) - P_{p}^{0}(0)}{T_{f}} = -\frac{G_{f}[P_{tot}^{0}(t) - P_{tot}^{0}(0)]}{T_{f}}$$
(Eq.22)

Na Eq. 22, Psc e Ptot representam a potência do canal de controle na entrada do amplificador e a potência total na saída do amplificador, respectivamente. Os termos G_f e T_f são os mesmos já descritos na seção anterior (2.7.1).

2.7.3 Controle por Emissão por Laser (Lasing)

As técnicas de controle de ganho totalmente óptico ou de controle automática de ganho são as mais estudadas, elas são soluções eficientes para minimização das variações de ganho e transientes de potência originados em no processo de amplificação com EDFA's em redes de

múltiplos [47-48] comprimentos de onda. Das técnicas de controle totalmente óptico duas formas são encontradas na literatura, uma que utiliza uma realimentação com característica de anel (*ring laser*), realimentação esta que permite obter o laser/canal de controle filtrado do ASE do EDFA[49] e a outra similar na qual o laser de controle é obtido com a utilização de grades de Bragg (FBG-*Fiber Bragg Grattings*) [50] na entrada e saída do sinal. Nas duas técnicas o EDFA é utilizado como o meio ativo de onde será retirado o laser de controle (canal de controle), em um comprimento de onda que esteja dentro da banda de amplificação do EDFA, no entanto, fora da faixa dos canais que estão sendo transmitidos.

O método de interesse neste trabalho é o da realimentação óptica em anel (Ring Laser), que será objeto de simulação e configurações experimentais nos capítulos 3 e 4. Neste método com a configuração em anel (loop), conforme Figura 11[51] permite que parte do sinal do EDFA seja extraída (ACPL2 ao passar por um filtro óptico sintonizável e logo após por um atenuador variável, para depois disto ser reinserido na entrada do EDFA através do acoplador (ACPL 1). Com isto o sinal de realimentação (canal de controle) é amplificado em conjunto com os outros sinais que estão sendo transmitidos, após a passagem pelo EDFA o sinal de controle é novamente amostrado e entra em novo ciclo de realimentação. Passados vários ciclos, o canal de controle passar a ter potência suficiente para superar suas perdas e estar em níveis de potência que permitam a ele entra na disputa por ganho disponível do EDFA com os outros canais transmitidos. Desta maneira em função do nível de atenuação do canal de controle ele poderá estar em condição de ser o canal predominante em termos de ganho no sistema, visto que o amplificador estará em uma condição de saturação, assim o canal de controle passa a absorver as variações de ganho provocada pelas variações de potência na entrada do EDFA, oriundas dos ADD/DROP de canais, fazendo com que o ganho dos outros canais presentes no sistema tem pouco alteração.

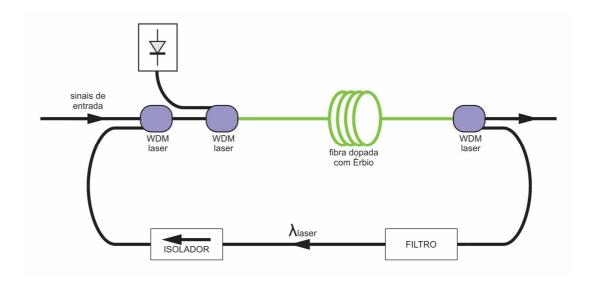


Figura 12- Esquema de um EDFA com controle de transientes com uso da técnica de Lasing/Ring Laser

O método de controle *ring laser* atua quando há potência de entrada do EDFA varia, sobretudo há grande sensibilidade da técnica, visto que os amplificadores ópticos na maior parte dos casos trabalha na região de saturação. Assim em cenário de operação o sistema controle funciona como um conjunto das potências do canal de controle dos canais transmitidos, que em conjunto formam a potência de entrada do EDFA. Qualquer variação que altere o valor da entrada, devido a *ADD/DROP* de canais por motivos diversos (falhas, reconfigurações, etc.), poderá levar o sistema a ter presente o efeito de transientes e degradar os sinais (canais transmitidos) – OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*), e piora da BER (*Bit Error Rate*). Porém, o uso de técnica de controle é justamente para minimizar ou mitigar os efeitos dos transientes de potência.

Desta maneira, fica evidente que o ganho do EDFA tem forte dependência da potência de entrada. Logo o canal de controle em função destas flutuações/variações de potência na entrada do sistema de amplificação terá maior e menor condição de ganho de potência, em função do número de canais que será inserido ou retirado do sistema. Obviamente os canais sobreviventes também experimentam as mesmas condições do canal de controle.

Nestas condições, em um cenário em que há a inserção de canais, há um aumento na potência de entrada do EDFA, o que faz com que o ganho por canal diminua, visto mais canais presentes e disputando os portadores disponíveis no meio ativo, incluindo o canal de controle. Com a inserção de canais é preciso que o canal de controle concorra menos por portadores, já que agora tem mais canais no sistema, consequência disso é que haverá mais portadores

disponíveis para os canais transmitidos, de modo que possa haver um aumento no ganho deles e compensando a queda provocada pela inserção de mais canais. Por outro lado quando há retirada de canais, a soma das potências do canal de controle e transmitidos diminuem na entrada do EDFA, o que permite um aumento no ganho dos canais sobreviventes e no canal de controle. Nesta situação, o canal de controle passa a absorver grande parte dos portadores excitados diminuindo a oferta para os demais canais presentes no sistema de amplificação. Consequência disso é há uma redução no ganho para os canais transmitidos, pois há essa compensação com o uso de do canal de controle, evitando que o aumento que ocorreria devido a redução do número de canais no sistema.

O desempenho da técnica de *ring laser* é fortemente influenciada por vários parâmetros, com destaque: comprimento de onda do laser de emissão (canal de controle), tempo de recuperação do ganho dos amplificadores, frequência de oscilação de relaxação do laser, *spectral hole burning* (SHB), número de canais retirados/adicionados entre outros.

Dentre os parâmetros citados os que são os principais limitadores no processo de controle totalmente óptico e são fenômenos indesejáveis, temos o SHB e a frequência de oscilação de relaxação do laser. A presença destes fenômenos faz que haja diferença nos valores de ganho dos canais sobreviventes antes e depois de variações de potência na entrada do EDFA, e também pelos transientes de potência que ocorrem no intervalo de restabelecimento dos valores de ganho, após as variações na entrada do EDFA [48,52-53].

O projeto do controle automático de ganho obviamente busca ter um sistema que não sofra com as variações de potência de entrada do sinal. Mas, na prática não é assim o sistema de controle não atua de maneira imediata, há tempo de resposta associado ao equilíbrio da troca de portadores do canal de realimentação com o meio ativo [54-55], o que provoca oscilações amortecidas na potência dos canais sobreviventes [52], conforme mostra a Figura 13.

Na Figura pode ser observado comportamentos distintos do canal sobrevivente analisado: no momento de remoção de canais com uma frequência de oscilação mais rápida e uma menor quando da inserção de canais. Outro fato é que mesmo com as oscilações pode ser visto que o canal, passado o período dos transientes, é corrigido, ou seja, o ganho do canal é tende a voltar para o valor original que tinha antes da adição ou retirada de canais, o que mostra a efetividade da técnica de controle de realimentação (*ring laser*).

Na Figura 13, fica bem evidenciado o SHB (*spectral hole burnig*), que também é parâmetro limitador da técnica de controle totalmente óptica. Este fenômeno faz com que haja imprecisão na correção do ganho, objetivado pela técnica, ou seja, quando da retirada o adição de canais, o nível de ganho dos canais sobreviventes não volta ao ser valor inicial. Quando termina o período das oscilações, o nível de ganho passar para um valor maior ou menor do que o inicial, respectivamente se a potência de entrada do amplificador diminui o aumenta. Como ilustrado na fig.13, o SHB aparece com um degrau no nível de potência.

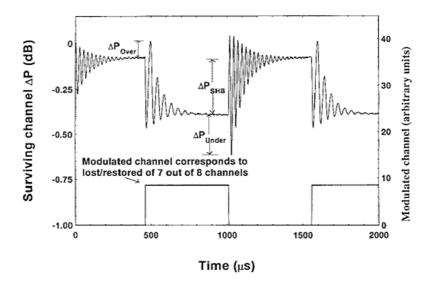


Figura 13- Variação de potência do canal sobrevivente com uso da técnica de controle de ganho com realimentação óptica (*ring laser*), com canal de controle (ou de realimentação) em 1536 nm [52]

Vários estudos e resultados experimentais [48,52-53] apontam as duas componentes remanescentes no canal sobrevivente, vistas acima, sendo uma de natureza estática que é a SHB e a dinâmica frequência de oscilação de relaxação do laser. Sendo que a componente dinâmica origina elevados picos de excursão de potência, desta foram tem maior influência no sistema de controle e amplificação do que a componente estática, que com visto na Figura 13, apenas produz um desvio residual (ou degrau) da potência dos canais sobreviventes, em estado estacionário. Além disso, é observado que se o comprimento de onda do canal de realimentação não for fixado próximo à banda ocupada pelos canais transmitidos, há predominância da componente estática. Desta maneira, deve haver um compromisso para escolha do comprimento de onda do canal de realimentação, com intuito de minimizar os efeitos das componentes estática e dinâmica da excursão de potência. Pois, não é possível selecionar um

comprimento de onda para o canal de realimentação por emissão laser que evite ambas as componentes da excursão remanescente de potência [38].

A modelagem matemática para a técnica de controle de ganho de emissão laser em anel (*Ring laser*), pode ser feita com base nas equações do modelo dinâmico do EDFA descrita no inicio do capítulo, na qual são adicionadas outras equações para descrever a emissão laser.

Considerando em um primeiro momento o canal de realimentação (lasing) com mais um sinal que passa pelo sistema de amplificação do EDFA a equação para a potência do sinal de emissão laser ($P_I^L(t)$), como referência na Eq. 16, é:

$$P_l^L(t) = P_l^0(t) \exp[(g_l + \alpha_l)L\rho(t) - \alpha_l L]$$
 (Eq..23)

Onde l representa o sinal de emissão laser, L o comprimento da fibra dopada, sendo que a variação da potência espectral e temporal:

$$P_l^{0,L}(t) = P_l(z = 0, L; t)$$
 (Eq..24)

Na situação em que a realimentação (*lasing*) for alcançada e o laser estiver operando acima do seu limiar, por simplicidade na determinação da inversão de população, o ganho do comprimento de onda do laser é fica igual às perdas do anel (*loop*). Desta forma, a Eq. 23 fica reescrita assim:

$$1 = R \exp[(g_l + \alpha_l)L\rho_T(t) - \alpha_l L]$$
 (Eq..25)

Onde o termo R representa a fração de potência laser na saída do EDFA e que é realimentada na entrada do mesmo, conforme Figura 11. Já o termo T indica a condição limite, em estado estacionário, para ocorrer ação de *lasing*. Com isto, a equação para o limite de inversão de população, pode ser escrita como:

$$\rho_T = \frac{\alpha_l + \frac{1}{L} \ln(\frac{1}{R})}{g_l + \alpha_l}$$
 (Eq.26)

Já a equação para a potência laser pode ser reescrita com base na Eq. 20, isolando a fração de potência laser que não é realimentada na entrada do amplificador. Assim é obtido [38]:

$$P_{l}^{L} \frac{(1-R)}{\alpha_{l}L} = -\sum_{i} \frac{P_{i}^{0}}{h\nu_{i}\xi\tau} \{ \exp[(g_{i} + \alpha_{i})\rho_{T} - \alpha_{i}]L - 1\} - \frac{\rho_{T}}{\tau} + \frac{u_{p}P_{p}^{0}}{h\nu_{p}\xi\tau} \{ 1 - \exp[-u_{p}\alpha_{p}L(1-\mu_{p}A(1-\mu_$$

2.8 Conclusões.

Foram vistos neste capítulo os princípios básicos de funcionamento do EDFA, que permite conhecer um pouco de sua dinâmica de funcionamento, sobretudo na descrição do comportamento dele na modelo de 2 níveis, que demonstram como ocorre o processo de amplificação com este dispositivo. Também foram mostrados o modelo e os componentes básico de um sistema de amplificação com EDFA (sinal, laser de bombeio, EDF, acopladores, isoladores), com isto há uma base inicial teórica que permitirá o uso das ferramentas de simulação, já que foi possível com o descrito no capítulo conhecer os parâmetros principais e relevantes, neste ambiente, já que a modelagem faz uso do modelo dinâmico também descrito.

Além disso, foram apresentados conceitos das técnicas de controle de transientes de potência do EDFA, que são de fundamental importância nos projetos com amplificação com fibra dopada a Érbio, sobretudo em sistemas de múltiplos estágios de amplificação, todas elas tem limitações, em função de tempo de resposta, sendo que as técnicas de controle de enlace e bombeio tem este limite muito dependente da resposta do circuito eletrônico envolvido, enquanto a técnica de emissão laser tem esse tempo dependente da oscilação do laser de realimentação. A técnica de emissão laser será a técnica utilizado nas simulações e experimentos deste trabalho, em função da sua simplicidade e disponibilidade de elementos para sua montagem experimental no laboratório.

3 Estudo da dinâmica do ganho de EDFAs através de simulações em computador

3.1 Introdução

Para estudar alguns casos do comportamento do EDFA, nas questões espectrais e temporais, baseadas nas modelagens numéricas já mostradas no capítulo anterior, foram feitas simulações no software comercial *Optsystem* ® versão 7.0.

Este, consagrado e inovador software, ou melhor, um pacote simulação de comunicações ópticas, permite testar, projetar, e otimizar virtualmente qualquer tipo de enlace óptico na camada física, em uma longa faixa do espectro óptico, com possibilidade de simulações que vão desde transmissões de vídeos analógicos até enlaces (*backbones*) intercontinentais [56]. Pelos motivos citados e o interesse em investigar melhor o uso da ferramenta o software foi escolhido para os estudos desta dissertação.

Neste trabalho os componentes de especial interesse foram o EDFA na versão Dinâmica (EDFA *Dynamic*) que permite com relativa precisão obter bons resultados para avaliação do comportamento das variações de potência e em consequência dos transientes de potência na situação de *ADD/DROP* de canais. O EDFA comum é utilizado para avaliação das análises que envolvem apenas questões espectrais ou seja de ganho dos canais de Entrada do EDFA. Por fim um arranjo simulado é feito com técnica de *Gain Clamped* [57] que é simulada para o controle de potência por emissão laser (*lasing*).

As simulações feitas no *Optisystem* buscaram refletir configurações que fossem possíveis, em grande parte, experimentalmente no laboratório de Comunicações Ópticas da UFF. As características do EDFA utilizado em bancada foram, quando cabível, utilizadas como informação para as configurações dos EDFA's utilizados nas simulações no *Optisystem*.

3.2 Estudo de Casos

Os casos estudados, conforme já citado, permitiram o estudo da dinâmica do EDFA e uma posterior validação qualitativa com os resultados experimentais, visto que as características do EDFA que será utilizado posteriormente nos experimentos, são valores padrões do fabricante e não há caracterização de fato do utilizado na bancada. Desta forma, os valores fornecidos para a fibra dopada à Érbio da *Metro Gain*, modelo M5 (980/125), são estes

descritos na tabela 1, os parâmetros principais e que tinham equivalência foram utilizados como informações para configurações das propriedades dos EDFA's simulados no *Optiystem*.

Tabela 1 – Parâmetros Principais da fibra dopada a Érbio M5

Parâmetro	Valor	Unidade
Abertura	0.21-0.24	-
Numérica		
Absorção	4.5-5.5	dB/m
@980 nm		
Atenuação	<10	dB/km
@1200 nm		
Comprimento	12	m
Raio do núcleo	1.6	μm
Raio dopado	1.6	μm
com Érbio		
Densidade de	7.85x10 ²	m ³
íons de Érbio		
Tempo de vida	10	ms
metaestável (τ)		

Na Figura 14, abaixo, são vistos os parâmetros inseridos nas respectivas caixas de configuração do EDFA no *Optisystem*, com base nos valores listados anteriormente.

Mai			Oinstallan	l Kinsa	. [
Mai	n Cross-sect Nu	merical	Simulation	Nois	e Rand	Random nu	
Disp	Name		Value		Units	Mode	
	Length			12	m	Normal	
	Er metastable lifetime		10		ms	Normal	
	Loss at 1550 nm		0.01		dB/m	Normal	
	Loss at 980 nm		0.015		dB/m	Normal	
	Input data	fiberS	pecification			Normal	
	Saturation parameter		3.65	e+015	1/(s.m)	Normal	
	Numerical aperture		0.21			Normal	
	Er ion density		7.85e+024		m^-3	Normal	
П	Core radius			1.6	um	Normal	
Г	Er doping radius			1.6	um	Normal	

Figura 14- Parâmetros de Configuração do EDFA no Optsystem.

Outro parâmetro importante para simulação são os parâmetros de emissão e absorção (g e a), ou em outras palavras, a seção de choque de absorção e emissão do EDFA, em função do comprimento de onda que também foi fornecido pelo fabricante – Figura 12. Esta

informação é inserida com a extensão ".dat" na aba das *Cross Section File Name* do EDFA – Figura 13.

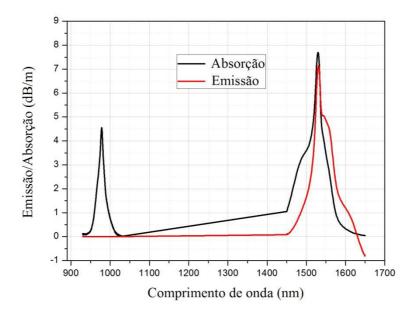


Figura 15- Gráfico da seção de Choque de Emissão e Absorção do EDFA fornecido pelo fabricante (fonte *Metro Gain* M5/980)

Main Cross-sect No		Nume	rical	Simulation	Noise	Rand	om nu
Disp	Name			Value		Units	Mode
	EDFA_Design forma	t					Normal
	File frequency unit		nm			Normal	
П	Cross section file n	ame	AttGa	inM5.dat			Normal

Figura 16- Tela configuração do Optisystem para parâmetros da seção de choque e absorção do EDFA

Além dos parâmetros do EDFA, nas simulações, o tempo de processamento, número de amostras, etc., são fundamentais para obtenção das medidas permitam uma boa modelagem do cenário em questão e que vão de encontro com outros resultados encontrados na literatura. Nos cenários estudados um ponto importante é a frequência do sinal modulado, que simula o efeito de adição e retirada dos canais, o valor escolhido foi de 200 Hz, para o cenário experimental, ou para configurar nos parâmetros gerais de processamento do *Optisystem*, o equivalente a uma taxa de bit (*Bit rate*) de 400 bps, conforme Figura 17.

Simulation Signals	Spatial effects Noise Sig	nal tracing	
Name	Value	Units	Mode
Simulation window	Set bit rate		Normal
Reference bit rate	V		Normal
Bit rate	400	Bits/s	Normal
Time window	0.02	S	Normal
Sample rate	25600	Hz	Normal
Sequence length	8	Bits	Normal
Samples per bit	64		Normal
Number of samples	512		Normal

Figura 17- Tela da configuração dos parâmetros gerais de processamento do *Optisystem* para os cenários simulados

Esta configuração do EDFA é a base a ser usada em todos os casos que são mostrados a seguir.

3.2.1 Arranjo do EDFA com um canal modulado na entrada (Configuração simulada I)

O primeiro arranjo simulado é o que irá observar o comportamento EDFA, com apenas um canal na entrada, sendo que este canal será modulado, com uma taxa de bits de 400 bps, para simular o efeito de *ADD/DROP* de canais. Neste caso análise foi feita em cenários distintos sendo elas:

- a) O canal de entrada tem o comprimento de onda de 1554,94 nm, ou canal 28 (conforme grade ITU-G), com variação na potência entrada do canal em valores distintos (-10, -15, -20 dBm), e a potência do sinal de bombeio (983nm), será mantida fixa em 40 mW, conforme arranjo mostrado na Figura 15.
- b) O canal de entrada com potência fixa em -15 dBm e o laser de bombeio sendo variado em três valores potências (30, 40 e 70 mW). Este cenário também utiliza a mesma configuração da fig.15

O EDFA utilizado é o modelo Dinâmico, que como a teoria já abordada utiliza o modelo de dois níveis.

Os outros componentes utilizados seguem a configuração básica do EDFA apresentado na seção 2, apenas são introduzidos componentes após o laser (canal de entrada)

para sua modulação em amplitude, que são o gerador de sequência de bits (*Bit Sequence Generator*), Gerador de pulso NRZ (NRZ *Pulse Generator*), Modulador de Amplitude (Amplitude Modulador) e na saída da modulador AM é inserido um Osciloscópio e OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*) para observar o comportamento deste sinal antes da entrada do EDFA. Os componentes de visualização auxiliaram como ponto de observação para analisar o sinal e verificar se está com frequência, potência, etc., conforme configurado. O sinal após ser modulado é inserido em um Mux ideal (*Ideal Mux*) e logo após conectado ao acoplador para associar o bombeio na direção co-propagante e entrar assim no EDF para a amplificação do sinal. Na saída do EDF é colocado um atenuador variável com uma perda similar a que se tem em um sistema experimental, por último o sinal para análise no temporal e obtido com o uso do ODTR na saída do atenuador Óptico. Estes componentes, dados algumas variações nos cenários, são a base para os casos que se seguiram.

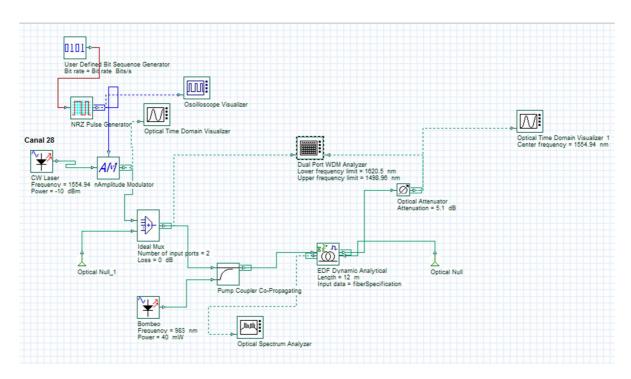


Figura 18- Configuração Simulada I

3.2.1.1 – **Resultados**

Os resultados obtidos nestes primeiros cenários, são mostrados no gráfico da Figura 19, que mostram as excursões de potência do canal para as diferentes potências, para a simulação I no cenário a.

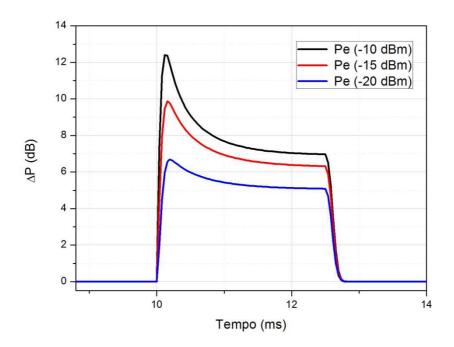


Figura 19 – Excursão Temporal do canal 28 para diferentes níveis de bombeio (Simulação I cenário a)

Tabela 2 – Ganho dos sinais para as diferentes potências de entrada da Simulação I cenário a.

Potência	Ganho (dB)
Entrada (Pe)-	
dBm	
-10	17,35
-15	21,09
-20	23,91

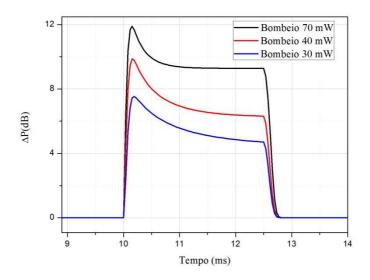


Figura 20 – Excursão Temporal do canal 28 para diferentes níveis de bombeio (Simulação I cenário b)

Tabela 2 – Ganho para diferentes bombeio com potência de entrada do canal 28 em -15 dBm (Simulação I- cenário b)

Bomb eio (mW)	Ganho (dB)
30	18,88
40	21,09
70	24,16

No gráfico da Figura 16 pode-se observado a dinâmica de ganho do EDFA, quando dá variação da potência de sinal, neste caso com a variação desta e com uma potência de bombeio fixa. Nesta Figura ainda observa-se um *overshoot* no instante inicial da excursão de potência do canal observado (canal 28) e em sequência uma condição de ganho em estado estacionário, descrito pela variação de potência(ΔP) que se torna maior com o aumento da potência do sinal. Na subida inicial do pulso, tem a resposta de um sinal não saturado, evidenciado pelo *overshoot* no ganho, que cai depois para uma condição de estado estacionário, o que ocorre após o balanço entre a taxa de absorção da bomba e a taxa de emissão estimulada dos sinais é alcançada. Adicionalmente, nota-se que o pulso inicial, ou saturante, tem maior ganho, já que ele presencia o instante de maior inversão de população do meio ativo.

Já constante de tempo associada ao pico do sinal (*overshoot*) fica menor a medida que o sinal de entrada é maior, observa-se que a um estreitamento do pulso.

Uma abordagem com relação a análise espectral, ou do ganho do sinal puramente, pode ser feita com base na tabela 2, nota-se que o ganho oferecido pelo EDFA fica menor a medida que o sinal fica mais forte, em consonância com o comportamento do EDFA, da dependência do ganho em função da potência de entrada. [19].

A Figura 17, que ilustra o caso b, ou seja, um sinal de entrada fixo em -15 dBm, com a variação da potência de bombeio (30, 40 e 70 mW), a excursão de potência do canal tem comportamento similar ao caso a, com um *overshoot* inicial e depois uma queda até a condição de estado estacionário. O pulso saturante (inicial), neste caso, tem um estreitamento e o tempo de saturação diminui a medida em que a um aumento na potência de bombeio. Com relação ao ganho do sinal, de acordo com a dependência do ganho com o bombeio, há um aumento do ganho à medida que o bombeio aumenta, conforme tabela 3.

Dos dois casos acima (Ia Ib), sobretudo analisando as fig16 e 17, nota-se que as constantes de tempo associadas a dinâmica de ganho do EDFA (que é da ordem de centenas de µs) são funções da saturação produzida pelas potências de bombeio e do sinal de entrada [18].

3.2.2. Arranjo do EDFA com um canal modulado e um canal sobrevivente na entrada (Configuração Simulada II)

Neste segundo arranjo é introduzido um canal sobrevivente, com comprimento de onda de 1558,98 nm – canal 23 (ITU-T-*Grid*), o arranjo simulado no *Optisystem* é mostrado na Figura 18.

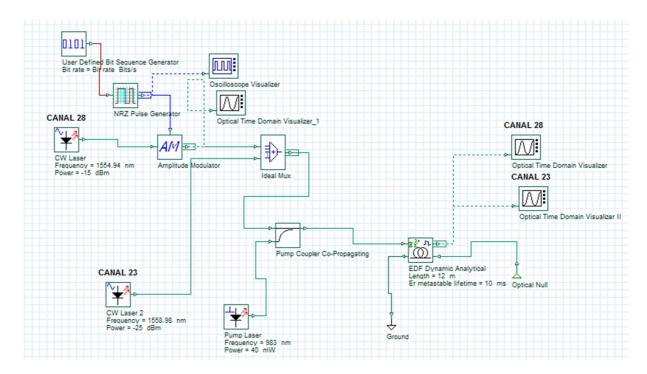


Figura 21- Configuração Simulada II (um canal modulado e um canal sobrevivente)

3.2.2.1 – **Resultados**

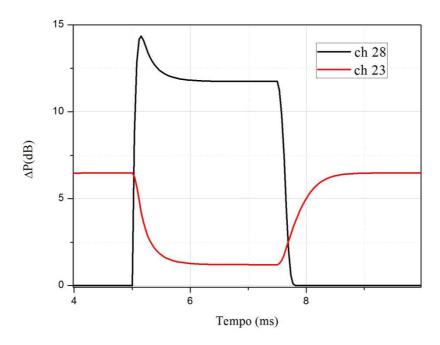


Figura 22 – Potência do sinal na saída do EFDA para um canal modulado (ch. 28) e um canal sobrevivente (23).

Tabela 3 – Ganho dos canais para a configuração simulada II

Canal	Pot. Entrada (dBm)	Ganho (dB)
23	-25	20,71
28	-15	20,91

Outro caso que permite observar a dinâmica de ganho do EDFA é o obtido com a um sinal mais forte (sinal saturador), modulado em amplitude (configuração mostrada na introdução), e um outro sinal em CW (*continuos wave*) com potência menor (*probe signal* – sinal de teste). O comportamento destes sinais obtidos na saída do amplificador é ilustrado na Figura 22.

Conforme a Figura 22, assim também como na simulação I, na subida do canal 28, de maior potência, há no inicio do pulso a resposta de um sinal não saturado, evidenciado pelo

overshoot, que após alguns instantes cai até chegar a uma condição de estado estacionário, atingida depois do balanço entre a taxa de absorção do sinal de bombeio e a taxa de emissão estimulada dos sinais no meio ativo. Outra análise do gráfico é com relação ao sinal de teste (canal 23) o ganho do mesmo cai com constante de tempo do sinal modulado. Por outro lado esta constante de tempo decresce quando há um aumento da potência do sinal do canal sobrevivente, isto se deve ao aumento da taxa de emissão estimulada. Como visto anteriormente o aumento da potência de bombeio também faz com que haja diminuição no tempo de queda do overshoot. Contudo, a constante de tempo de recuperação do sinal de teste, ou seja, para chegada a uma condição de estado estacionário, é função apenas da taxa de bombeio, pois a taxa de emissão estimulada do sinal de teste, neste caso, é muito baixa para influenciar neste valor.

Já com relação a ganho dos canais, conforme tabela 4, são bem próximos, visto que na região linear de ganho do EDFA conforme mostrado na Figura 7 do capítulo 2.

Por fim, dos resultados obtidos nos dois primeiros casos, uma conclusão relevante é com relação a lenta dinâmica do EDFA, justificada pelos efeitos dos transientes de saturação de ganho e tempo de recuperação ocorrem em escala de tempo entre 100 µs e 1 ms. Portanto, os sistemas com EDFAs são intrinsicamente imunes aos efeitos de *cross-talk* entre canais em um sistema WDM que opere em altas taxas de transmissão. [58-59]

3.2.3 Arranjo com adição e retirada (*ADD/DROP*) de Canais (Configuração Simulada III)

Nesta simulação, o estudo da dinâmica de ganho do EDFA prossegue, em um cenário que é mais próximo do que é implementado em ambiente de operação. A simulação montada, ilustrada na Figura 20, utiliza 4 canais sendo um modulado e o restante (sobreviventes) em CW, a tabela 5, lista os canais utilizados e suas respectivas potências de entrada.

Para o primeiro cenário deste arranjo (cenário III a) houve a simulação com a presença dos 4 canais. Os canais 21, 23 e 26 em operação CW, com -15dBm de potência foram sendo gradativamente desligados, enquanto que o canal 28 foi mantido modulado digitalmente com taxa de 400 bps. Desta forma nesta simulação foram testadas as seguintes condições: quando há 1 canal modulado com 3 sobreviventes (canais 21, 26 e 23); quando há 1 canal modulado com 2 sobreviventes (canal 26 e 23); quando há 1 canal modulado e 1 canal sobrevivente (canal

23); e quando há somente o canal modulado. Em cada evento deste foi coletado no OTDR o sinal do canal sobrevivente e do canal modulado, que trarão os resultados para análises posteriores, que foram feitas sobre um canal sobrevivente selecionado (canal 23) e o canal modulado (28).

Outro cenário simulado (cenário III b), similar ao anterior com relação aos canais e sequência de retirada dos mesmos. Contudo com uma diferença, neste arranjo foi feito um reequilíbrio da potência de entrada do EDFA, ou seja, com a retirada dos canais sobreviventes, um de cada vez, ajustou-se o nível de potência com os canais que permaneciam, de modo que a potência de entrada do EDFA fosse constante. Os resultados obtidos e a análise deles seguem na seção seguinte.

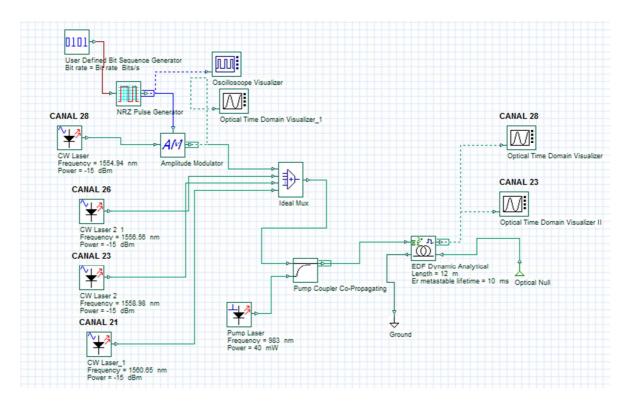


Figura 23 – Configuração para simulação III.

Tabela 4 – Canais utilizados no Setup

Comp. Onda λ	Canal
1554,94	28
1556,56	26
1558,98	23
1560,65,	21

3.2.3.1- Resultados para simulação de *ADD/DROP* para cenário III a

Neste cenário a potência de todos os canais foram ajustadas para -15 dBm.

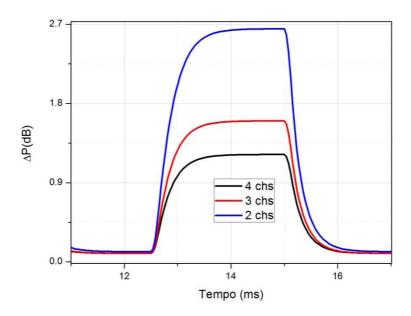


Figura 24 – Gráficos de variação de potência do canal 23 com ADD/DROP de canais para cenário III a.

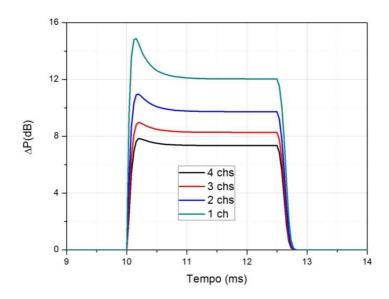


Figura 25 – Gráficos de variação de potência do canal 28 com ADD/DROP de canais para cenário III a.

As Figuras 24 e 25 mostram as excursões temporais dos canais 23 e 28 com a retirada gradativa dos canais sobreviventes. A Figura 20 mostra as excursões temporais do canal sobrevivente 23 como resultado da retirada gradativa de canais nas diferentes condições testadas. Na Figura 24 e em preto quando 4 canais (4 chs) participam da simulação: o canal modulado 28 e os 3 sobreviventes (canais 21, 26 e 23). Na Figura 24 e em vermelho quando 3 canais (3chs) participam da simulação: o canal modulado 28 e os 2 sobreviventes (canais 26 e 23). E na Figura 21 e em azul quando 2 canais (2chs) participam da simulação: o canal modulado 28 e o canal sobrevivente 23. A Figura 25 mostra as excursões temporais do canal modulado 28 como resultado da retirada gradativa de canais sobreviventes nas diferentes condições testadas. Na Figura 25 e em verde quando 4 canais (4 chs) participam da simulação: o canal modulado 28 e os 3 sobreviventes (canais 21, 26 e 23). Na Figura 22 e em azul quando 3 canais (3chs) participam da simulação: o canal modulado 28 e o canal sobrevivente 23. E na Figura 25 e em preto quando somente o canal modulado 28 e o canal sobrevivente 23. E na Figura 25 e em preto quando somente o canal modulado 28 (1chs) participa da simulação (canais 21, 26 e 23 desligados).

Os resultados obtidos e mostrados na Figura 24 demonstram que a excursão de potência, caracterizada pelo parâmetro ΔP , no canal sobrevivente analisado (canal 23) tornase maior na medida em que canais vão sendo retirados, A excursão de potência tem uma

variação em torno de 1 dB quando na presença dos 4 canais na simulação e varia para aproximadamente 2,5 dB quando há apenas dois canais, como pode ser observado na Figura 24 para 2chs e 4chs. Para o canal modulado (canal 28) a potência em estado estacionário cresce à medida que há menos canais ativos no sistema. Com a presença dos 4 canais da simulação observa-se uma variação de potência no canal 28 de 7 dB e quando permanece somente o canal modulado a variação de potência é em torno de 11 dB. Estas variações de potência nos canais analisados são muito fortes e retratam bem o que ocorre em ambientes de produção quando temos retirada de canais, fato que reforça a necessidade do uso das técnicas de controle de ganho para evitar as penalidades de potência no sistema [18].

3.2.3.1- Resultados para simulação de ADD/DROP para cenário 3b

Neste cenário o a potência na entrada do EDFA é mantida constante, compensando a retirada de canais com o aumento de potência nos canais que permanecem, conforme mostrado na tabela 6, abaixo.

Tabela 5 – Canais na entrada do EDFA com *ADD/DROP* mantendo potência constante na entrada do EDFA

Comp. Onda λ	Canal	Pot. Saída MUX (dBm) 4 chs	Pot. Saída MUX (dBm) 3 chs	Pot. Saída MUX (dBm) 2 chs	Pot. Saída MUX (dBm) 1 ch
1554,94	28	-15	-15	-13,27	-8,97
1556,56	26	-15	-15	-	-
1558,98	23	-15	-12	-11	-
1560,65,	21	-15	-	-	-
Somatóri Potênc		-8,97	-8,97	-8,97	8,97

Nos gráficos da Figura 26 e Figura 27 é mostrado uma análise das variações de potência do canal sobrevivente (23) e 28 (modulado), quando dá retirada de canais, conforme a sequência da tabela (4 canais, 3 canais, 2 canais, 1 canal).

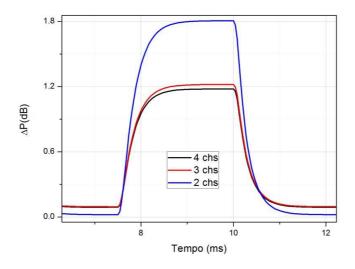


Figura 26 – Gráficos de variação de potência do canal 23 com ADD/DROP de canais para caso 3b.

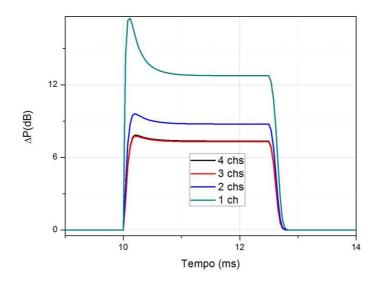


Figura 27 – Gráficos de variação de potência do canal 28 com ADD/DROP de canais para caso 3b.

As Figuras 26 e 27, similar ao cenário anterior, mostram as excursões temporais dos canais 23 e 28 com a retirada gradativa dos canais sobreviventes.

Os resultados obtidos e mostrados na Figura 26, confirmam o que foi simulado no cenário 3 a, ou seja, o ΔP , no canal sobrevivente analisado (canal 23) torna-se maior na medida em que canais vão sendo retirados. Contudo neste cenário, no qual é mantida constante a potência de entrada no EDF, a variação de potência para as diferentes configurações é menor que no caso anterior. Observando-se a variação de potência do canal 23, conforme Figura 26, na presença de 4 canais e em torno de 1 dB, para 3 canais em torno de 1,2 dB e para 2 canais próximo a 1,8 dB, comparando com o cenário anterior estes valores eram respectivamente 1,2 dB, 1,5 dB e 2,5 dB. Disto pode-se observar que as variações de potência do canal sobrevivente analisado são menores quando mantida constante a potência de entrada no EDF. Semelhante ao caso anterior (cenário 3a), o canal modulado (canal 28), demonstra também que a potência em estado estacionário cresce à medida que há menos canais ativos no sistema. Comparandose, assim como feito com o canal 23, o canal 28 modulado no cenário de ajuste da potência de entrada (cenário 3b) tem um ΔP de 12,5 dB para 1 canal, de 9 dB para 2 canais e em torno de 7 dB para 3 e 4 canais. Neste cenário comparando com o caso anterior o canal modulado tem comportamento bem similar entre os dois cenários para o caso da presença de 1 e 2 canais, com ΔP 's bem próximos, visto que no caso sem ajuste o ΔP era de 12 dB para 1 canal e 10 dB para 2 canais, conforme Figura 21. Por fim a diferença maior fica para a condição do canal modulado na presença de 4 canais e 3 canais que ficam com valores praticamente iguais no cenário do ajuste de potência, com ΔP de aproximadamente 7 dB. Conforme Figura 23 a condição de estado estacionário do canal é alcançada no mesmo patamar de potência nestas duas condições (4 chs e 3 chs), tal fato não é observado no cenário anterior (Figura 21). Com isto, observouse que na condição de ajuste de potência e com pequenas variações do ADD/DROP de canais há menos impacto da variação de potência no canal no EDF.

3.2.4 . Arranjo do EDFA com controle de ganho todo óptica por realimentação (*lasing*) (Configuração Simula IV)

Nesta Seção foi feita a simulação do uso da técnica de controle de ganho totalmente óptica *lasing*, também conhecida como realimentação em anel (*ring laser*) do EDFA. Nesta configuração de simulação foram utilizados os mesmos 4 canais da Configuração de Simulação anteriores. Porém, para implementar a técnica de controle de ganho foram inseridos alguns componentes ópticos e configurados alguns parâmetros no simulador *OptiSystem* com o

objetivo de visualizar as respostas temporais dos canais de observação. A base para montagem desta configuração foi o tutorial do programa e modelagem utilizada no exemplo EDFA *Gain Clamping* [57]. O canal de controle ou em outras palavras de realimentação é reinserido na entrada do MUX, fazendo um loop de modo que em que cada passagem no laço vai adquirindo potência suficiente para competir com outros canais pelo ganho do EDFA.

O atenuador variável (VOA) utilizado na configuração, conforme mostrado na Figura 24 controla a potência do canal de realimentação. Foram escolhidos quatro valores de atenuação para uso no VOA e usados nas simulações a seguir: 0.5, 10, 11 e 15 dB. A realimentação foi feita no comprimento de onda de 1550 nm, escolhido a partir do filtro óptico gaussiano da Figura 24.

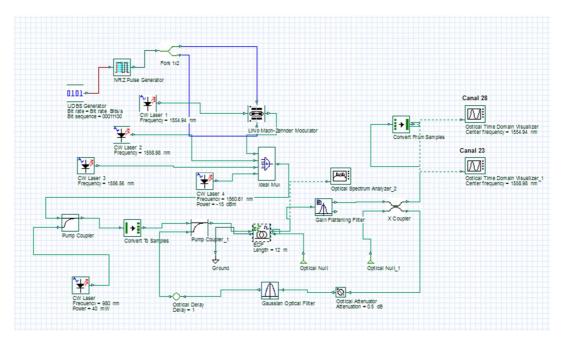


Figura 28 — Configuração *OptiSystem* controle de ganho com realimentação toda óptica (*lasing*) — Simulação IV

3.2.4.1 – Resultados da simulação do lasing

Nas Figuras 25,26, 27 e 28, obtidas diretamente no *OptiSystem*, a resposta temporal do canal modulado 28 (Figuras: 25a, 26a, 27a e 28a) e o canal sobrevivente 23 (Figuras: 25b, 26b, 27b e 28b), observa-se que há uma significativa supressão dos transientes do canal 23 (sobrevivente) observado. Na medida em que a atenuação do canal de realimentação é alterada, ou seja, quanto menos atenuado é o canal de realimentação, mais caracteriza-se o efeito do controle de ganho, visto que o canal sobrevivente passa a ter excursões de potência cada vez menores. Nota-se também, dos resultados apresentados nas Figuras: 25b, 26b e 27b, que a

potência em estado estacionário do canal sobrevivente é da ordem de 0.2 dBm com atenuação de 11 dB e em torno de -9 dBm com a atenuação de 0.5 dB (Fig. 25b e 27b). Pode ser observado nas respostas do canal sobrevivente (Figuras: 25b, 26b e 27b) os efeitos da frequência de oscilação de relaxação do laser e do SHB [48,52-53].

É importante perceber nas Figuras 25a, 26a e 27a a forte supressão do pico de *overshoot* no canal modulado 28 comparado com a configuração sem o controle de ganho (Configuração de Simulação III) apresentado na Figura 21 ou também no caso de maior atenuação do canal de realimentação, com 15 dB (Figura 28a). Nesta situação o canal de realimentação está fortemente atenuado e já não atua no controle dos transientes, ou seja, o canal sobrevivente apresenta comportamento similar ao caso sem controle. Isso pode ser verificado comparando as Figura 28b e Figura 20. Outra análise importante é com relação à atenuação da potência de estado estacionário do canal 28 a qual observa-se que varia em torno de 8 dB quando a atenuação do VOA passa de 10 dB para 0.5 dB (Figuras: 25a e 26a).

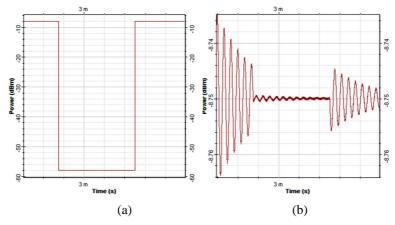


Figura 29 – Análise dos Canais 28(a) e 23(b) com Atenuador em 0.5 dB.

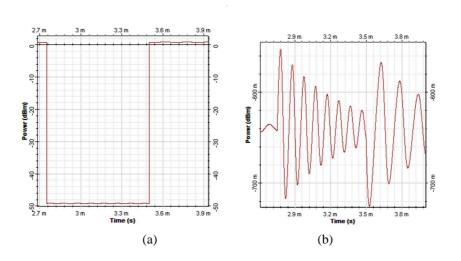


Figura 30 - Análise dos Canais 28(a) e 23(b) com Atenuador em 10 dB.

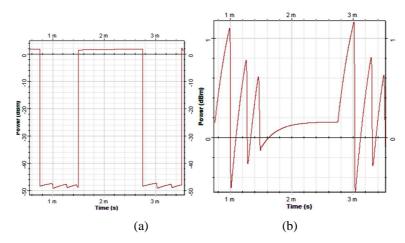


Figura 31 — Análise dos Canais 28(a) e 23(b) com Atenuador em 11 dB.

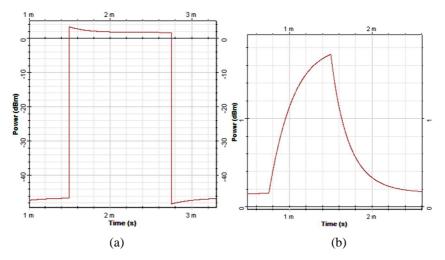


Figura 32 - Análise dos Canais 28(a) e 23(b) com Atenuador em 15 dB.

3.3 Conclusões

Os arranjos simulados com o uso do *Optisystem* permitiram uma boa base de referência e concordância com os modelos teóricos apresentados na sessão anterior.

Os arranjos simulados descreveram bem o comportamento do EDFA e sua lenta dinâmica de ganho, visto nos arranjos simulados nas configurações 1 e 2. As configurações 3 e 4 possibilitaram visualizar a forte influência do EDFA em cenários de *ADD/DROP* de canais e que reforçam a importância do uso de técnicas de controle de ganho. Por fim a simulação da técnica de ganho totalmente óptica (*ring laser*) que mostrou-se eficaz na redução do efeito de

transientes no canal sobrevivente mas que por outro lado, dado o grau de atenuação do canal de controle, reduz significativamente a potência do canal modulado.

Na seção seguinte são mostrados os arranjos e resultados obtidos nos experimentos realizados no Lacop, que dentro da viabilidade técnica disponível, replicaram os arranjos simulados.

4 Estudo Experimental da Dinâmica de ganho do EDFA

Este capítulo tem por objetivo validar os resultados das simulações obtidos nos estudos de caso mostrados no capítulo anterior, e, desta forma, confirmar a teoria envolvida na dinâmica de ganho observada. Por questões de interesse didático, os experimentos e seus resultados serão apresentados na mesma sequência apresentada na no capítulo 3. Os canais obervados nos experimentos nas análises temporais são os mesmos observados na simulação, ou seja, canal modulado (28) e canal sobrevivente (23).

Nas configurações experimentais foi utilizado um conjunto de Amplificação EDFA da OptoSci®, com fibra dopada com Erbio MetroGain® M5(980/125). O laser sintonizável utilizado foi fabricado pela Agilent-8163B, sintonizados nos canais 21 e 28. Para o canal 26 foi utilizado um laser diodo semicondutor com encapsulamento *butterfly* fabricado pela Cyoptics, P/N D2525P26 e para o canal 23 foi utilizado um laser semicondutor da Thorlabs também com encapsulamento *butterfly*. O multiplexador/demultiplexador óptico é um conjunto WDM-MUX e DEMUX ACPHOTONICS, Inc., P/N DWDM108MC212122. O VOA utilizado (*Variable optical attenuator*) foi o fabricado pela *Pacifics* (0,4 – 40 dB). Os fotodetectores utilizados foram o; PDA-10CS-InGaAs, fabricado pelo Thorlabs e o fotodetector fabricado pela OptoSci-InGaAs. O analisador de espectro óptico (OSA) utilizado é um Yokohama AQ6370 e o osciloscópio Agilent modelo DSO-X-2012A. Outros detalhes, dos principais componentes utilizados, estão contidos no anexo deste trabalho

As comparações e validações da simulação com os resultados experimentais foram feitas de forma qualitativa, visto que não foram obtidas com o fabricante as características corretas do EDFA utilizado. As características fornecidas são o valor default para fibra dopada com Érbio da MetroGain®.

4.1 Configuração Experimental I

A configuração Experimental I foi montada conforme a fig.30, as características do experimento são equivalentes a configuração simulada I da seção anterior, ou seja taxa de 400 bps, canal modulado (28). As seguintes configurações para este arranjo foram:

a)Cenário com a potência de entrada (canal 28) ajustada para os valores de -20, -15 e -10 dBm, com o laser de bombeio (983 nm) com potência fixa em 40 mW;

b) Cenário com a potência de entrada (canal 28) fixa em -15 dBm e variação da potência de bombeio para os valores de 10, 40 e 70 mW.

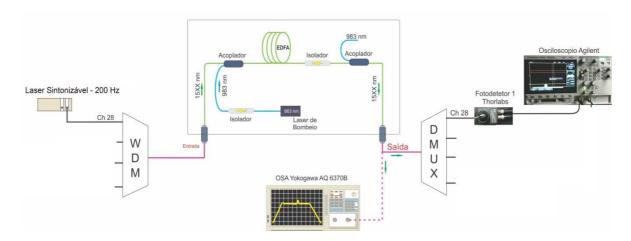


Figura 33 - Configuração Experimental I.

4.1.1 Resultados

Os resultados obtidos no experimento I, são mostrados nos gráficos das Figuras que se seguem (Figuras 34, 35, 36 e 37) mostram as excursões de potência do canal para as diferentes potências, bem como um gráfico dos ganhos obtidos nos diferentes cenários, no caso: a e b descritos anteriormente.

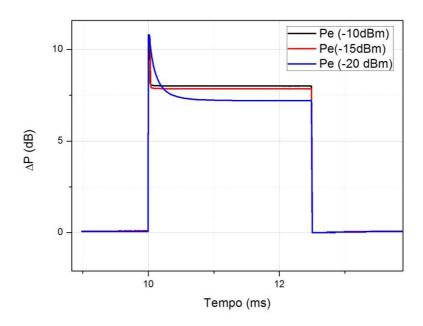


Figura 34 – Excursão Temporal do canal 28 com potência de bombeio fixa com diferentes valores do sinal de entrada (Configuração Experimental I cenário a)

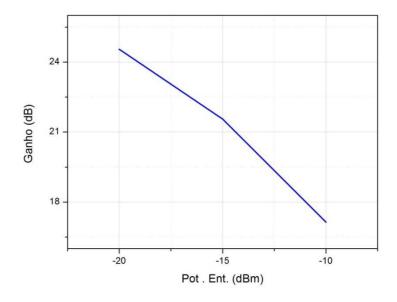


Figura 35 – Gráfico do Ganho em função da potência de entrada (Configuração Experimental I cenário a)

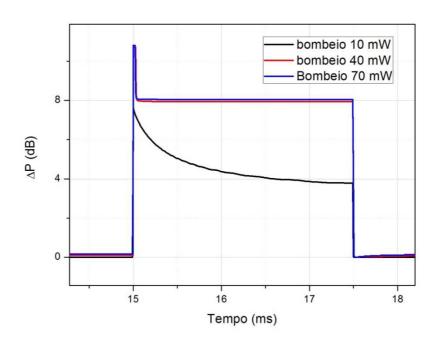


Figura 36 – Gráfico do Ganho em função da potência de entrada (Configuração Experimental I cenário b)

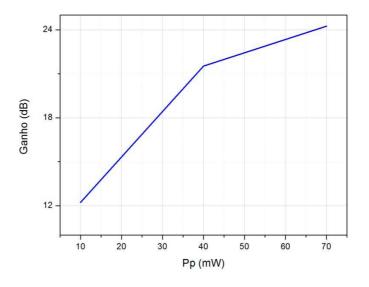


Figura 37 – Gráfico do Ganho em função da potência de entrada (Configuração Experimental I cenário b)

Os resultados obtidos no experimento I vão de encontro com o comportamento obtidos no capítulo 3 para a configuração simulada I. Por exemplo no caso da Figura 34, assim como na Figura 20, observa-se a questão do *overshoot* inicial do canal (28) seguido pela condição de

ganho em estado estacionário. Nos dois casos, experimental e simulado, o ΔP crescem com o aumento da potência de sinal, o que valida os resultados obtidos. O comportamento do ganho também é validado, pois nota-se que ele é maior para os valores de potência do sinal de entrada menores na entrada do amplificador, o que vai também de encontro com as considerações teóricas abordadas no capítulo 2.

Com relação aos resultados do experimento I para o cenário b, as análises feitas para a simulação também são semelhantes. Observa-se o ΔP da parte experimental e simulada, conforme respectivamente Figuras 34 e 20, que o mesmo cresce a medida que há um aumento na potência de bombeio. Adicionalmente, outra validação é com relação ao ganho obtido na simulação conforme tabela 4 e no caso do experimento mostrado através do gráfico da Figura 37, o mesmo cresce a medida que cresce o bombeio. Contudo, este valor de ganho aumenta a uma taxa linear na faixa do bombeio de 10 a 40 mW e a partir daí vemos que este ganho cresce numa proporção bem menor para faixa de 40 a 70 mW, visto que aí o EDFA já trabalha numa condição de saturação.

4.2 Configuração Experimental II

A configuração Experimenta II, teve sua implementação conforme Figura 38. Os canais utilizados são os mesmo da configuração simulada II, da seção anterior, ou seja, canal 28 (modulado em 200 Hz) e canal sobrevivente (23). A potência do canal 28 foi ajustada em -15 dBm e do canal 23 em -25 dBm.

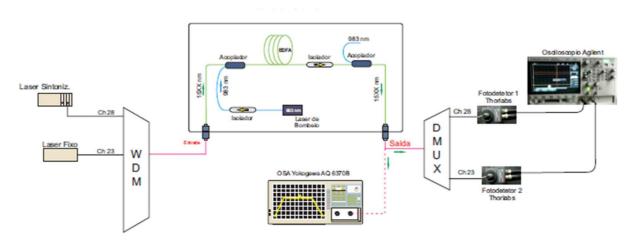


Figura 38 - Configuração Experimental II.

4.2.1- Resultados para configuração Experimental II

A excursão temporal dos sinais dos canais sobrevivente e modulado obtidos no experimento são mostrados na Figura 39.

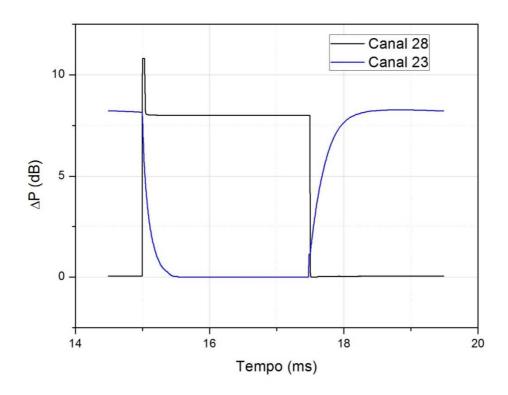


Figura 39 – Potência do sinal na saída do EFDA para um canal modulado (ch. 28) e um canal sobrevivente (23) – Configuração Experimental II.

Como a configuração simulada II o a configuração experimental II, com base nos gráficos obtidos (Figura 22 e Figura 39), há um mesmo comportamento a menos dos valores dos ΔP 's alcançados, o que valida os resultados experimentais qualitativamente. Desta forma, as análises feitas no ambiente de simulação se aplicam também para o ambiente experimental.

4.3 Configuração Experimental III

Na configuração experimental III (Figura 40) os arranjos realizados são similares aos da configuração simulada III. Os canais utilizados no experimento são os mesmos mostrados na tabela 5 do capítulo 3.

Assim como na simulação o experimento tem os dois cenários:

a) Arranjo com o uso dos 4 canais (um modulado e 3 sobreviventes). Os canais 21, 23 e 26 em operação CW, com -15dBm de potência foram sendo

gradativamente desligados, enquanto que o canal 28 foi mantido modulado digitalmente com taxa de 400 bps. As sequencias de retirada dos canais foi feita na mesma sequência da simulação, tendo as condições observados no canal 28 (modulado) e sobrevivente (23): quando há 1 canal modulado com 3 sobreviventes (canais 21, 26 e 23); quando há 1 canal modulado com 2 sobreviventes (canal 26 e 23); quando há 1 canal modulado e 1 canal sobrevivente (canal 23); e quando há somente o canal modulado.

b) O outro cenário na mesma sequência de retirada anterior e com o ajuste da potência de entrada do EDFA, assim, com a retirada dos canais sobreviventes, um de cada vez, ajustou-se o nível de potência com os canais que permaneciam, de modo que a potência de entrada do EDFA fosse constante. Os valores ajustados para os canais para atender a condição requerida são mostrados na tabela 7. Obviamente, por uma condição de cenário experimental real, os valores da potência de entrada não ficam exatamente iguais, como conseguidos na simulação. Visto que em laboratório temos vários fatores que influem nestes ajustes, tais como: temperatura do ambiente, tempo de uso do equipamento, entre outros, o que de modo algum prejudica os resultados obtidos.

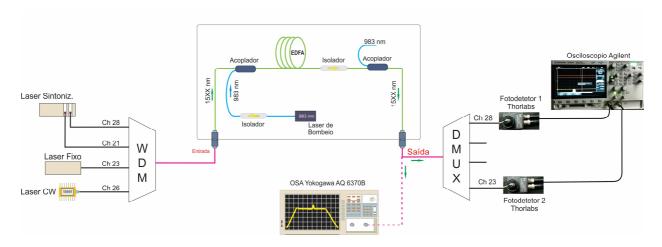


Figura 40 - Configuração Experimental III.

4.3.1 Resultados para Configuração Experimental III

Nas Figuras que se seguem são mostrados os gráficos que mostram as excursões temporais dos canais para os cenários realizados, com base na análise dos sinais medidos dos canais 23 e 28.

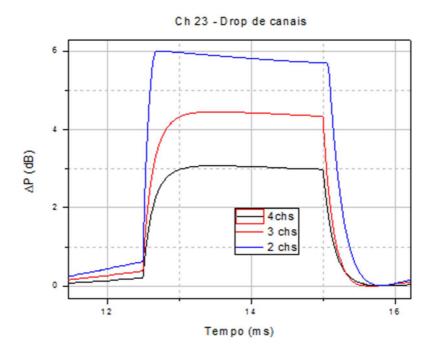


Figura 41 – Gráficos de variação de potência do canal 23 com *ADD/DROP* de canais para Experimento III caso a

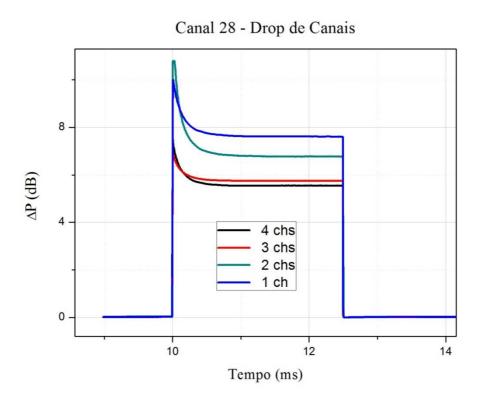


Figura 42 – Gráficos de variação de potência do canal 28 com *ADD/DROP* de canais para Experimento III caso a.

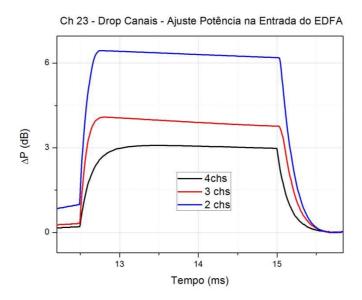


Figura 43 – Gráficos de variação de potência do canal 23 com *ADD/DROP* de canais para Experimento III caso b.

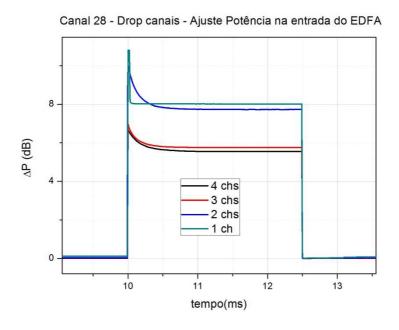


Figura 44 – Gráficos de variação de potência do canal 28 com *ADD/DROP* de canais para Experimento III caso b.

Tabela 6 – Canais na entrada do EDFA com *ADD/DROP* mantendo potência com valores constantes (dentro de uma dada variação) na entrada do EDFA

Comp. Onda λ	Canal	Pot. Saída MUX (dBm) 4 chs	Pot. Saída MUX (dBm) 3 chs	Pot. Saída MUX (dBm) 2 chs	Pot. Saída MUX (dBm) 1 ch
1554,94m	28	-15,42	-15,07	-12,83	-8,37
1556,56	26	-14,89	-14,89	-11,19	-
1558,98	23	-14,94	-11,47	-11	-
1560,65,	21	-14,97	-	-	-
Somatóri Potênc		-9,03	-8,73	-8,92	-8,37

Os gráficos obtidos para o caso de potência dos canais sem ajuste de potência (Figuras 41 e 42), são bem semelhantes aos obtidos na configuração simulada III, cenário a (Figuras 24 e 25), de modo que a mesma análise feita lá se aplica no arranjo experimental. O comportamento tanto para o canal modulado e sobrevivente no cenário a são os mesmos obtidos na simulação o que traz a validação qualitativa para os resultados obtidos.

Adicionalmente, o mesmo raciocínio pode ser estendido para configuração simulada III, cenário b, comparando-se as Figuras 43 e 44, do experimentais, com as da simulação, Figuras 26 e 27. Tendo também a validação qualitativa dos resultados deste experimento.

4.4 Configuração Experimental IV

Neste experimento é utilizado o controle de ganho por emissão laser com realimentação em anel (*ring laser*,), similar a configuração simula IV que foi realizada no capítulo anterior. A Figura 45 mostra a configuração experimental implementada, em que a realimentação óptica foi implementada a partir da filtragem da ASE do EDFA. Em função da faixa de canais disponíveis no conjunto MUX – DEMUX o canal 24 foi selecionado para implementar a realimentação óptica. Um atenuador variável (VOA – *variable optical attenuator*) foi instalado entre o MUX e o DEMUX. Os valores de potência dos canais de entrada e a potência de bombeio foram mantidos nos mesmos valores da configuração simulada

IV (-15dBm), potência do laser de bombeio em 40 mW, bem como o canal 28 modulado com taxa de 200 bps. Já a potência filtrada do canal 24 e a faixa de atenuações utilizadas no VOA são mostradas na Tabela 7.

Figura 45 – Configuração Experimental IV

Tabela 7 - Valores de ajustes de Atenuação com o VOA para o canal de *Lasing* 24 - Configuração para Experimental

Canal 24 – Lasing / Bombeio de 40 mW			
Atenuação (ATN)	dB		
1	11 dB		
2	9,6 dB		
3			
(sem atenuação -apenas Insertion.Loss do Atenuador Variável)	0,6 dB		

Os valores de atenuação foram escolhidos para poder observar os efeitos da mitigação dos transientes de potência nos canais de análise e observar os fenômenos que ocorrem com estes diferentes ajustes, como feito também na simulação IV Com isto é possível observar comportamentos similares entre o resultado obtido por simulação e o obtido experimentalmente no laboratório, que vão de encontro com a teoria da dinâmica de ganho do EDFA.

4.4.1 Resultados para configuração experimental IV

As medidas obtidas das excursões temporais, dos canais selecionados 23 e 28 são mostradas nas Fig. 46, Fig.47 e Fig.48 que exibem os resultados experimentais obtidos com as variações de atenuação de realimentação conforme a Tabela 7.

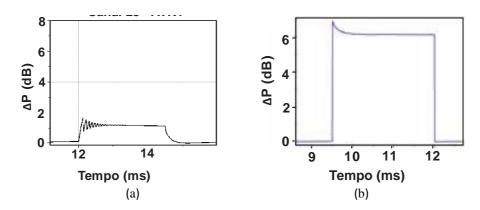


Figura 46 – Análise temporal das excursões de potência do canal 28(b) e do canal 23(a) – Configuração Experimental IV- Atenuação 1 (ATN 1).

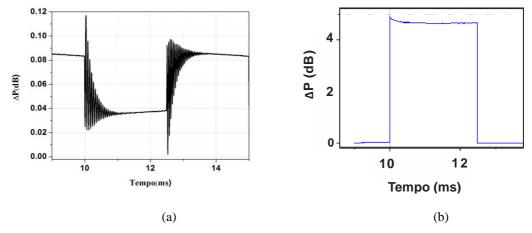


Figura 47 - Análise temporal das excursões de potência do canal 28(b) e do canal 23(a) — Configuração Experimental IV — Atenuação 2 (ATN2).

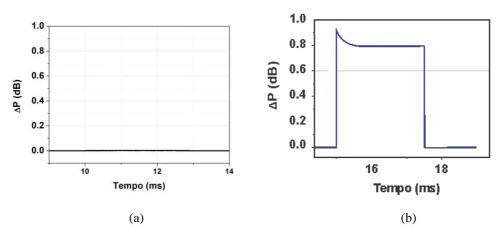


Figura 48 -- Análise temporal das excursões de potência do canal 28(b) e do canal 23(a) - Configuração Experimental-IV-Atenuação 3 (ATN3).

Os resultados experimentais apresentados nas Figuras. 46,47 e .48 podem ser comparados qualitativamente com os resultados simulados na configuração simulada IV no capítulo IV. Na Figura 46, e com o VOA ajustado em 11dB, observa-se que com uma maior atenuação do canal de realimentação temos uma pequena mitigação do efeito de transiente no canal 23 (sobrevivente). Nesta condição, o ΔP cai para em torno de 1,5dB. Comparando com o resultado simulado e apresentado na Figura 27 temos um comportamento similar.

Na Figura 47, e com o VOA ajustado em 9.6dB, é possível fazer uma validação qualitativa com o resultado da simulação mostrado na Figura 26. Tanto no experimento quanto na simulação realizada há forte mitigação do canal 23 (sobrevivente), com forte redução da variação de potência- $\Delta P(dB)$. Nas Figuras:26 e 47, e é bem evidenciado o fenômeno da frequência de relaxação e o SHB. Com o VOA ajustado em 9.6 dB, o canal de realimentação inserido no MUX com maior potência, passando a disputar fótons com os outros canais presentes na faixa de ganho do EDFA. Já com relação ao canal 28 (modulado) observa-se que para esta atenuação de 9.6dB um $\Delta P(dB)$ de 4,5 dB, conforme Figura 47b, em outras palavras uma maior penalização de potência do canal modulado quando comparado com a Figura 46b, para atenuação de 11 dB, na qual o $\Delta P(dB)$ é de 6 dB

Na Figura 48, são mostradas as excursões temporais dos canais 23 (sobrevivente) e 28 (modulado) com o VOA ajustado para a menor atenuação, 0.6 dB, que é a perda de inserção do dispositivo. Nesta condição, foi obtida a realimentação do canal 24 com a maior potência possível na entrada do MUX. Nesta configuração o efeito de transientes no canal 23 é mitigado, conforme pode ser verificado na Figura 48. Com os fotodetectores e equipamentos utilizados

não foram observados os efeitos da frequência de relaxação e SHB em razão dá sensibilidade presentes nestes, frente a amplitude dos sinais a serem medidos. Para o canal 28 (modulado) observou-se uma redução do ΔP para 0.8 dB, que corresponde a uma redução de aproximadamente 5 dB em relação ao ΔP para atenuação de 11 dB, conforme o que observa comparando a Figura 46 com a Figura 48.

Ainda observa-se que a frequência de oscilação do laser do canal sobrevivente tem excursões de potência e frequência maiores no momento do DROP de canais, conforme mostram os resultados simulados e experimentais apresentados, por exemplo na Figura 26 e Figura 47. Este fato reforça a importância da análise destes efeitos nos projetos das redes que por falhas, retiradas de canais ou reconfigurações podem provocar ΔP 's com valores acima dos quais venham a aumentar a taxa de erro do sistema.

5 Conclusões.

As variações de potência dos canais amplificados em EDFAs tem forte efeito de transientes, sobretudo quando submetida a *ADD/DROP* de canais na rede. Os cenários simulados com o *Optisystem* foram de encontro com a teoria envolvida e derem base para os cenários experimentais, o que reforça o mesmo com uma poderosa ferramenta para projetos de Comunicações Ópticas. Desta forma os efeitos transientes dentro dos cenários estudados puderam ser analisados através das simulações e validados qualitativamente através de resultados experimentais. Os resultados obtidos mostraram a importância do uso de métodos de controle de ganho para evitar penalizações severas em sistema e redes WDM.

Especialmente, foi utilizada, em simulação e experimento, a técnica de controle totalmente óptica de controle de potência por realimentação *lasing ou* em anel (*ring laser*). Adicionalmente, torna-se necessário analisar cuidadosamente o uso de técnicas de controle de ganho. Deve se buscar um balanço entre a mitigação dos efeitos de transientes oriundos da modulação cruzada, característicos em sistema WDM, com o ganho do amplificador. Em outras palavras, este balanço deve ser focado no não comprometimento das potências dos canais no receptor de forma a viabilizar a detecção com baixa BER. Notadamente este trabalho utilizou um único EDFA. É importante mencionar que em sistemas ópticos onde é utilizado um conjunto de EDFAs em cascata, devem-se utilizar técnicas e soluções com um compromisso de mitigação dos efeitos dos transientes de potência que levem em consideração o conjunto total de amplificadores, como é feito para sistemas onde a amplificação hibrida EDFA/RAMAN está presente[18].

Logo, este trabalho mostrou que é de fundamental importância o conhecimento do comportamento da dinâmica de ganho do EDFA, dentro dos seus modelos teóricos alinhados com situações com simulação em ambiente computacional e em implementações em bancada, assim como da técnica de controle de ganho a ser utilizada. Este conhecimento é a base para projetar de maneira adequada e eficiente o sistema de amplificação e os esquemas de proteção que possam ser usados, de modo a existir um nível de serviço da rede dentro parâmetros e qualidades exigidos num sistema de Telecomunicações, fato que este trabalho, de maneira simples e objetiva, buscou demonstrar com simulações e validações através de configurações experimentais de custo baixo, porém de significativa base de conhecimento e resultados.

Houve várias situações, sobretudo na parte experimental que dificultaram parte do processo e que limitaram alguns cenários: por exemplo, a aquisição de equipamentos como o laser de bombeio de 980 nm, que dependia de importação, que passam por um rito burocrático para serem adquiridos; equipamentos de laboratórios utilizados em alguns experimentos que se encontravam desgastados ou já danificados, no qual junto com o apoio dos professores e colegas do Lacop, tentamos reparar; estas e outras situações não permitiram realizar outros experimentos e ensaios que se buscavam inicialmente. Contudo vale salientar o empréstimo do Kit- EDFA – AMP da OptoSci, que foi gentilmente enviado da UFTSM do Chile para o LACOP, a título de empréstimo temporário, para realizar grande parte dos experimentos feitos neste trabalho e que representou enorme contribuição para parte experimental. Enfim tais situações, de certa forma contribuíram para aprofundamento de processos e procedimentos experimentais e fomentaram a busca das soluções, em conjunto com os orientadores, e que no fim proporcionaram dentro dos recursos que tinha a disposição um trabalho de valor científico e qualidade técnica.

Por fim para sugestões de trabalho futuro que ampliem ainda mais a base de conhecimento alcançado neste trabalho, seja nos estudos teóricos, ensaios computacionais e de bancada:

- Sistema de Amplificação Hibrida EDFA-RAMAN, em cenários com cascatas de amplificadores;
- Análise dos impactos e forma de mitigação relativos a taxa de transmissão e BER em rede WDM com Amplificação Híbrida;
- Técnica de controle automática de ganho associada com a técnica de controle óptico eletrônico (controle da potência da bomba e do laser de emissão);
- Análise experimentais de projeto de amplificação utilizando a fibra dopada a Érbio, com caracterização total dos elementos da fibra, com o uso do Método de *Cutt-off* [39]ou outros que permitam o conhecimento dos parâmetros para melhores resultados experimentais e de simulação em ambiente computacional (*Optisystem* ou similar).

6 Bibliografia

- [1] A.E. Willner, "Mining the Optical Bandwidth for a Terabit per Second", IEEE Spectrum, vol.34, pp. 32-41,1997.
- T.J. Xia, S. Gringeri e M. Tomizawa, "High-Capacity Optical Transport Networks", IEEE Com. Magazine, pp. 170-178, 2012.
- [3] S.S. Dixit and P.J. Lin, "Optical Networks Come of Age", IEEE Com. Magazine, p.56, 2000.
- [4] R.J. Essiambre e R. W. Tkach. "Capacity Trends and Limits of Optical Communication Networks", IEEE Proc., vol.100, pp. 1035-1055, 2012.
- [5] G.E. Keiser, "A Review of WDM Technology and Applications", Optical Fiber Technology, vol.5, pp. 3-39, 1999.
- [6] G.E. Keiser, "WDM Optical Networks: A Reality Check", IEEE Commun. Mag., vol.38, pp.58-60, 2000.
- [7] E. Dersuvire, Erbium-Doped Fiber Amplifier, Principles and Applications, New York: Wiley, 1994
- R.J. Mears, L. Reekie, P. R. Morkel e D.N. Payne, "Low Noise Erbium-Doped Fiber Amplifier Operating at 1.54 μm". Electron. Lett., vol. 23, pp. 1026, 1987.
- [9] R. I. Laming, L. Reekie, P.R. Morkel e D. N. Payne, "Multichannel Crosstalk and Pump Noise in an Er³⁺ Doped Fibre Amplifier Pumped at 980 nm", Electron Lett., vol.25, n° 7, pp. 455, 1989.
- [10] E. Dersuvire, J. R. Simpson e P. C. Becker, "High-Gain Erbium-Doped Traveling-Wave Fibre Amplifier, Opt. Lett., vol. 12, pp. 888-890, 1987.
- [11] C. R. Giles, E. Dersuvire, J.R. Talman, J. R. Simpson e P. C. Becker, "2 Gbits/s Signal and Amplification at $\lambda = 1.53~\mu m$ in an Erbium-Doped Single-Mode Fiber Amplifier, J. Lightwave Technol., n° 1, vol.7, pp. 651-656, 1989.

- [12] C. R. Giles, C. A. Burrus, D. J. Di Giovanni, N. K. Dutta e G. Raybon, "Characterization of Erbium-Doped Fibers and Application to Modeling 980 nm and 1480 nm Pumped Amplifiers", IEEE Photon. Tecnol. Lett., vol. 3, n° 4, pp. 363-365, 1991.
- J. L. Zyskind, C. R. Giles, J. R. Simpson e D. J. Di Giovanni, "Erbium-Doped Fiber Amplifiers and the Next Generation of Lightwave Systems", AT&T Technical Journal, pp. 53-61, 1992.
- E. Dersuvire, C. R. Giles e J. R. Simpson, "Gain Saturation Effects in High-Speed, Multichannel Erbium-Doped Fiber Amplifiers at $\lambda = 1.53 \, \mu \text{m}$ ", J. Lightwave Technol., vol. 7, n° 12, pp. 2095-2104, 1989.
- [15] E. Dersuvire, "Analysis of Transient Gain Saturation and Recovery in Erbium-Doped Fiber Amplifiers", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 1, pp. 196-199, 1989.
- [16] J. L. Zyskind, Y. Sun, A. K. Srivastava, J. W. Sulhoff, A. J. Lucero, C. Wolf e R. W. Tkach, "Fast Power Transients in Optically Amplified Multiwavelength Optical Networks", Proc. 1996 Optical Fiber Conference, paper PD31-1, 1996.
- [17] A. Mecozzi e D. Marcenac, "Theory of Optical Amplifiers Chains", J. Lightwave Tecnol., vol. 16, pp. 745-756, 1998.
- R. Olivares, "Estudo de Transientes de Potência e de Técnicas de Controle em Redes Ópticas WDM Baseadas em Cascatas de Amplificadores a Fibra Dopada com Érbio (EDFA)", Tese de Doutorado, CETUC-PUC/RJ, 2000.
- [19] G. Agrawal; "Nonlinear Fiber Optics, Optics and Photonics", Academic Press, 5th edition, 2012.
- [20] C. R. Giles e E. Dersuvire; "Transient Gain Crosstalk in Erbium-Doped Fiber Amplifiers", Opt. Lett., vol.14, n° 16, pp. 880-882, 1989
- [21] L. Tančevski, L. A. Rusch e A. Bononi; "Gain Control in EDFA's by Pump Compensation", IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 10, n° 9, pp. 1313-1315, 1998.

- [22] A. K. Srivastava, Y. Sun, J. L. Syskind e J. W. Sulhoff,; "EDFA Transient Response to Channel Loss in WDM Transmission System", IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 9, pp. 386-388,1997.
- [23] K. Motoshima, L. M. Leba, D. N. Chen, M. M. Downs, T. Li e E. Dersuvire; "Dynamic compensation of Transient Gain Saturation in Erbium-Doped Fiber Amplifiers by Pump Feedback Control", IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 5, no 12, pp. 1423-1426, 1993.
- [24] A. K. Srivastava, J. L. Zyskind, Y. Sun, J. C. Ellson, G. Newsome, R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy, J. W. Sulhoff, T. A. Strasser, C. Wolf e J. R. Pedrazzani; "Fast-link Control Protection of Surviving Channels in Multiwavelength Optical Networks", IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 9, no 12, pp. 1667-1669, 1997.
- V. Radisavljevic-Gajic, "Non-linear integral control of photon Power transients in optical communications networks with erbium-doped fiber amplifiers",IET Journals, iet.cds2013.0421,2014
- [26] C. J. Koester e E. A. Snitzer, "Amplification in a fiber laser", Applied Optics, vol. 3, no 10, pp. 1182, 1964.
- B. Neto et al., "Evaluation of the Effect of Channel *Add/Drop* Impact on Power Transients on the Performance of a 10 Gb/s DWDM Transmission System with Hybrid EDFA/Raman Amplification", IEEE Microwave and Optical Technology Letters,vol. 52, pp. 1225-1228, 2010.
- R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncy e D. N. Payne, "Low Noise Erbium Doped Fiber Amplifier Operating at 1,54 µm", IEEE Electronic Letters, vol. 23, pp. 1026, 1987.
- D. N. Payne, "Active Fibres and Optical Amplifiers", Fiber and Integrated Optics, vol. 11, pp. 191-219, 1992.
- [30] Y. Miyajima, T. Komukai, T. Sugawa e T. Yamamoto, "Rare Earth-Doped Fluoride Fiber Amplifiers and Lasers", Optical Fiber Technology, vol. 1, pp. 35-47, 1994.
- [31] M. Potenza, "Optical Fiber Amplifiers for Telecommunications Systems", IEEE Com. Magazine, 1997.

- P. Urquhart, "Review of Rare Earth Doped Fibre Laser and Amplifiers", IEEE Proc., n° 6, vol. 135, pp. 385-407, 1988.
- J. R.F. Oliveira, U. C. Moura, M. A. Romero, "Hybrid Distributed Raman/EDFA Amplifier with Hybrid Automatic Gain Control for Reconfigurable WDM Optical Networks", Journal of Microwaves, Optoelectronics and Eletromagnetic Applications, vol. 12, n° 2, 2013.
- [34] T. Tehara, T. Hoshida, J. Kumasako e H. Onaka, "128x 10.66 Gbit/s transmission over 840-km standard SMF with 140-km optical repeater spacing employing dual band distributed Raman Amplification", Proc. OFC 2000, pp. PD-28, 1999.
- [35] G. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, 1st ed., Ed. New York: J. Wiley&Sons, 1992.
- [36] C. R. Giles e E. Dersuvire, "Modeling Erbium-Doped Fiber Amplifiers", J. Lightwave Technol., vol. 9, n° 2, pp. 271-283,1991.
- [37] A. A. M. Saleh, R. M. Jopson, J. D. Evankow e J. Aspell, "Modeling of Gain in Erbium Doped Fibre Amplifiers", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 16, pp. 714-717, 1990.
- [38] S. R. Chinn, "Simplified Modeling of Transients in Gain-Clamped Erbium Doped Fiber Amplifiers", Journal of Lightwave Technology, vol. 16, pp. 1095-1100,1998.
- [39] M. Movassghi, "Characterization of Erbium Doped Fibers", Tese de Doutorado, Dept. of Eletrical Eng., The University of British Columbia, 1996.
- [40] S. Park, H. K. Kim, G. Y. Lyu, S. M. Kang e S. Y. Shin, "Dynamic Gain and Output Power Control in a Gain-Flattened Erbium-Doped Fiber Amplifier", IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 10, pp. 787-789, 1998.
- [41] H. Ono, K. Shimano, M. Fukutoku e S. Kuwano, "An EDFA Gain Control and Power Monitoring Scheme for Fault Detection in WDM Networks by Employing a Power-Stabilized Control Channel", IEEE JLT, vol. 20, pp. 1335-1341, 2002.
- B. Landousies, T. Georges, E. Delevaque, R. Lefreb e M. Monerie, "Low Power Transient in Multichannel Equalised and Stabilised Gain Amplifier Using Passive Gain Control", Elect. Lett., vol. 32, n° 20, pp. 1912-1913, 1996.

- [43] H. Dai, J. Pan e C. Lin, "All-Optical Gain Control of In-Line Erbium-Doped Fiber Amplifiers for Hybrid Analog/Digital WDM Systems", IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 9, n° 6, pp. 737-739, 1997.
- G. Sacchi, S. Sugliani, A. Bogoni, F. Di Pasquale, D. Muro, R. Magri, G. Bruno e F. Cavaliere, "Design and Experimental Characterization of EDFA-Based WDM Ring Networks With Free ASE Light Recirculation and Link Control for Network Survivability", IEEE JLT, vol. 23, n° 3,pp. 1170-1181, 2005.
- T. E. Darcie, R. M. Jopson e A. A. M. Saleh, "Electronic Compensation of Saturation-Induced Crosstalk in Optical Amplifiers", Elect. Lett., vol. 24, no 18, pp. 1154-1155, 1988.
- [46] M. Karásek e J. C. Plaats, "Modeling of a Pump-Power- Loss-Controlled Gain-Locking System for EDFA Application in WDM Transmission Systems", IEEE Proc. Optoelectron., vol. 145, n° 4, pp. 205-210, 1998.
- J. Chung, S. Y. Kim e C. J. Chae, "All-optical gain-clamped EDFAs with different feedback wavelengths for use in multiwavelength optical networks", Electron. Lett., vol.32, n° 23, pp. 2159-2161, 1996.
- [48] G. Luo, J. L. Zyskind, J. A. Nagel e M. A. Ali, "Experimental and theoretical analysis of relaxation-oscillations and spectral hole burning effects in all-optical gain-clamped EDFA's for WDM networks", J. Lightwave Tecnol., vol. 16, n° 4, pp. 527-533, 1998.
- [49] A. Yu e M. J. O'Mahony, "Design and modelling of laser-controlled erbium-doped fiber amplifiers", IEEE J. Quantum Electron., vol. 3, n° 4, pp. 1013-1018, 1997.
- [50] C. Kim, H. Yoon, S. Lee, C. H. Lee e Y. Chung, "All-optical gain controlled bidirectional add-drop amplifier using fiber Bragg gratings", IEEE Photon. Tecnol. Lett., vol. 12, no 7, pp. 894-896, 2000.
- Y. Liu e M. F. Krol, "Transient Gain Control in EDFA's by Dual-Cavity Optical Automatic Gain Control", IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 11, no 11, pp. 1381-1383, 1999.
- [52] G. Luo, J. L. Zyskind, Y. Sun, A. Srivastava, J. W. Sulhoff, C. Wolf e M.A Ali, "Performance degradation of all-optical gain-clamped EDFA's due to relaxation oscillations and

- spectral-hole burning in amplified WDM networks", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 9, n° 10, pp. 1346-1348, 1997.
- [53] A. Bahrampour e M. Mahjoei, "Theoretical Analysis of Spectral Hole Burning and Relaxation Oscillation in All-Optical Gain Stabilized Multichannel Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA)", IEEE JLT, vol. 19, n° 8, 2001.
- [54] Q. Yu e C. Fan, "Simple Dynamic Model of All-Optical Gain-Clamped Erbium-Doped Fiber Amplifiers", IEEE JLT, vol. 17, n° 7, 1999.
- [55] C.L. Zhao, H. Y. Tam, B. O Guan, Xinyong. Dong, P.K.A Wai, Xiaoyi. Dong, "Optical automatic gain control of EDFA using two oscillating lasers in a single feedback loop", Optics Communications, n° 225, pp. 157-162,2003.
- Optiwave Inc, "Optsystem Getting Started", Optsystem 7.0 documents, 2008
- [57] A. Yu and M. J. Mahony. "Design and Modeling of Laser-Controlled Erbium-Doped Fiber Amplifiers". IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 3, Issue: 4, pp.1013 1018, 1997.
- [58] F. Meli, M. Angellieri e G.Grasso, "Gain Crosstalk in Saturated EDFA for WDM Applications", Electronics Letters, vol. 28, pp. 1896-1897, 1992
- [59] I. Monroy, E. Tangdiongga, "Crosstalk in WDM Communication Networks", Springer Science, 2002.

7 Anexos

7.1 Conjunto EDFA – Kit OptoSci



Erbium Doped Fibre Amplifiers

Educator Kit

ED-AMP

COMPREHENSIVE LABORATORY BASED EDUCATIONAL PACKAGE IN ERBIUM DOPED FIBRE AMPLIFIERS (EDFAs)



MAIN FEATURES AND BENEFITS:

- All fibre optic and optoelectronic hardware required to perform the experimental investigation
- Extensive literature support including: student and instructor's manuals with exercises, solutions & sample results
- Detailed lecture notes, tutorial examples and solutions to assist with the development of courses
- Saves considerable course, literature and hardware development effort

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION* ADDRESSES:

- Full gain characteristics: small and large signal gain
- Signal / gain saturation
- Pump saturation
- Transparency point, gain gradient and gain efficiency
- · Saturated output power
- Amplified spontaneous emission (ASE) levels
- ASE-ASE & Signal-ASE beat noise
- Noise figure

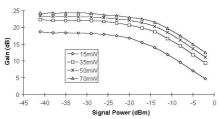
^{*} Full details of the experiments and equipment specifications are provided overleaf

Laboratory Exercises

The EDFA educator kit enables students to investigate the basic principles of optical amplification, to characterise the key technical performance parameters of EDFAs, and to develop an appreciation of the engineering applications of optical amplifiers and their limitations within these applications. The experiments include:

- Measurement of output power and gain over a large range of input signal levels for several fixed pump levels. This enables investigation of small signal gain, large signal gain and gain saturation.
- Determination of the saturated output power as a function of pump power.

Gain vs. Signal for Various Pump powers



- Measurement of output power and gain as a function of pump power at various levels of signal power.
- Determination of point of transparency, gain gradient and gain efficiency.
- Measurement of amplified spontaneous emission (ASE) as a function of pump power for no signal and various input signal levels spanning the range of small signal to signal saturation.
- Measurement of optical noise (ASE-ASE beat noise and Signal-ASE beat noise) as a function of input signal strength for various pump powers.

Product Description

The OPTOSCI EDFA laboratory educator kit consists of the following hardware elements:

- A connectorised erbium doped fibre amplifier pumped by a 980nm laser diode to provide small signal gains in excess of 25dB. The amplifier contains two optical isolators and has angle polished connectors to limit positive feedback and completely suppress oscillation (i.e. laser action).
- A 1550nm DFB laser source to provide the input signals. The source has been specially designed to provide signal levels in a range from approximately -40dBm up to 0dBm (1mW) without degradation of its coherence properties (i.e. its linewidth). This is required to enable the investigation of small and large signal gain with gain saturation.

- A custom designed photodiode detection system for measuring the input signal levels over a large (50dB) dynamic range. The unit also allows the measurement of the amplified AC signal power super imposed on a high guasi DC level of ASE.
- · Fixed 15dB In-line optical attenuator
- All of the necessary fibre cable patchcords to enable connection between the various units of the system.

In addition, a comprehensive literature package accompanies each kit:

- A set of student laboratory manuals describing the background theory and experimental procedure, with associated exercises to encourage the student to discuss the implications of their results.
- A complete instructor's manual dealing with all aspects of using the equipment and providing sample results for the experiments and exercises.
- Extensive lecture notes on EDFAs and their applications.
- A comprehensive set of tutorial examples and their solutions.

Accessories / Extension Modules

- SPECS: Laser safety spectacles with OD3+ at 1550nm are available directly from OPTOSCI.
- FILTER: An optical filter module enables investigation of the impact of optical filtering on the ASE & noise levels of the amplifier.
- A LASE add-on module to ED-AMP is available to extend this system to investigate the principles and characteristics of lasers (see LASE module datasheet for full details).
- A fully independent ED-LASE Principles of Lasers educator kit is also available (see ED-LASE datasheet for full details)

Additional required equipment:-

 A two channel laboratory oscilloscope with a minimum bandwidth of 20MHz.

Ordering Information

ED-AMP	Erbium Doped Fibre Amplifiers
SPECS	Laser Safety Specs. OD3+ 1550nm
FILTER	Optical Filter Module
LASE	Lasers Module

Since OPTOSCI are committed to continuously improving the design and performance characteristics of our products, these specifications are subject to change without notice.

Date: June 2011

OPTOSCI Limited 9 Cambuslang Road Glasgow G32 8NB Scotland

Tel / Fax: +44 (0)141 641 2344 E-Mail: info@optosci.com www.optosci.com

7.2 WDM- Multiplexer - Demultiplexer - AC Photonics



phone: 408.986.9838

email: sales@acphotonics.com website: www.acphotonics.com

100GHz 8-Channel Dense Wavelength Division Multiplexer



ACP's Dense Wavelength Division Multiplexer (DWDM) utilizes thin film coating technology and proprietary design of non-flux metal bonding micro optics packaging to achieve optical add and drop at the ITU wavelength. It provides ITU channel center wavelength, low insertion loss, high channel isolation, wide pass band, low temperature sensitivity and epoxy free optical path. It can be used for wavelength add/drop in telecommunication network system. All AC Photonics' products are Telcordia qualification tested.

Key Features

- 100GHz ITU Channel Spacing
- Low Insertion Loss
- Wide Pass Band
- High Channel Isolation
- High Stability and Reliability
- Epoxy Free Optical Path

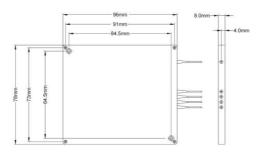
Applications

- Channel Add / Drop
- DWDM Network
- Wavelength Routing
- Fiber Optical Amplifier
- CATV Fiberoptic System

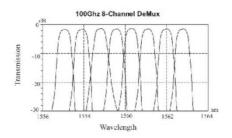
Performance Specifications

Parameter		Specifications			
Para	meter	Mux	Demux		
Channel Wavelength		ITU 100	GHz Grid		
Center Wavelength Acc	uracy	± 0.05nm			
Minimum Channel Space	sing	100GHz (0.8mm)			
Channel Passband (@-	0.5dB bandwidth)	≥ 0.22nm			
Insertion Loss		≤ 3.2dB	≤ 3.2dB		
Channel Uniformity		≤ 1.0dB	≤ 1.0dB		
Channel Ripple		≤ 0.3dB	≤ 0.3dB		
Channel Isolation	Adjacent	N/A	≥ 25dB		
Channel isolation	Non-adjacent	N/A	≥ 35dB		
Insertion Loss Tempera	ture Sensitivity	≤ 0.00	03dB/°C		
Wavelength Temperature Shifting		≤ 0.002nm/°C			
Polarization Dependent Loss		≤ 0.10dB			
Polarization Mode Dispersion		≤ 0.10ps			
Directivity		≥ 50dB			
Return Loss		≥ 45dB			
Optical Power		≤ 300mW			
Operating Temperature		0 to +70°C			
Storage Temperature		-40 to +85°C			
Package Dimensions		L96mm x W78mm x H8.0mm			

Mechanical Dimensions



Spectral Chart



Ordering Information

DWDM							
	Channel Spacing	Number of Channel	Configuration	1 st ITU Channel	Pigtail Style	Fiber Length	In/Out Connector
-	1 = 100GHz	08 = 8 Channel	M = Mux	C21 = 1560.61nm	1 = Bare Fiber	1 = 1.0m	0 = None
			D = Demux	C22 = 1559.79nm	2 = 900um Jacket	2 = 2.0m	1 = FC/APC
				C23 = 1558.98nm	3 = 3mm Cable		2 = FC/PC
				(*)	4 = 2mm Cable		3 = SC/APC
							4 = SC/PC
							5 = ST
							6 = LC/UPC
							7 = LC/APC

Product specifications and descriptions in this document subject to change without notice.
© AC Photonics, Inc.