
RELATÓRIO DE ESTÁGIO

Emprego dos Amplificadores Ópticos a Semicondutores (SOA) em redes ópticas reconfiguráveis

Orientador: José Ewerton P. de Farias

Aluno: Eduardo Cavalcanti Magalhães

Dezembro de 2008

Laboratório de Comunicações
Departamento de Engenharia Elétrica
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Universidade Federal de Campina Grande

Campina Grande - PB



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

**Emprego dos Amplicadores Ópticos a
Semicondutores (SOA) em redes ópticas
reconfiguráveis**

Relatório de Estágio Supervisionado

Orientador:

José Ewerton Pombo de Farias

Aluno:

Eduardo Cavalcanti Magalhães

Sumário

1	Introdução	5
2	Descrição	6
3	Princípios da amplificação óptica	8
4	Características fundamentais do dispositivo	9
4.1	Ganho de pequenos sinais e largura de banda	10
4.2	Saturação do ganho	11
4.3	Sensibilidade à polarização	12
4.4	Figura de Ruído	12
4.5	Não Linearidades	12
4.5.1	Mistura de quatro ondas	13
4.5.2	Modulação de Fase Cruzada	13
4.5.3	Modulação de ganho cruzado	14
5	Aplicações	15
5.1	Aplicações básicas	15
5.2	Aplicações funcionais	16
5.2.1	Conversor de comprimento de onda	17
5.2.2	Switch óptico	18
5.2.3	Multiplexadores ópticos de inserção e remoção (OADM)	19
6	Ferramenta de simulação	20
6.1	O software Optisystem 7.0	20
7	Simulações	21
7.1	Switch Óptico	22
7.2	Multiplexador óptico de inserção e remoção (OADM)	24
8	Conclusão	27
9	Referências Bibliográficas	29

Lista de Figuras

1	Diagrama esquemático de um SOA [1].	6
2	SOA de Fabry-Perot e de ondas viajantes ou propagantes [1].	7
3	TW-SOA (a) Estrutura de região ativa angulada. (b) Estrutura de material transparente [2].	8
4	Mecanismos que ocorrem entre dois níveis de energia (a) Emissão Espontânea. (b) Emissão Estimulada. (c) Absorção [3].	9
5	Ganho (dB) versus Potência de entrada (dBm).	11
6	Geração de mistura de quatro ondas [5].	13
7	Ilustração XGM [7].	14
8	Aplicação do SOA como amplificador de potência, amplificador de linha e pré-amplificador [1].	15
9	(a) <i>Switch</i> controlado eletronicamente. (b) <i>Switch</i> controlado opticamente [1].	18
10	<i>Switch</i> baseado no MZI simétrico [1].	19
11	Estrutura básica de um OADM.	19
12	OADM que utiliza um filtro refletivo [1].	20
13	Interface Gráfica do Optisystem 7.0 [13].	21
14	Biblioteca de componentes do <i>Optisystem</i> [13].	21
15	Configuração do transmissor	22
16	<i>Switch</i> óptico	22
17	Espectro do sinal na entrada e saída do <i>switch</i> óptico a 1 Gbps.	23
18	Espectro do sinal de entrada e saída do <i>switch</i> óptico a 10 Gbps.	23
19	Estrutura do OADM que utiliza um filtro refletivo [12].	25
20	Espectro do canal removido e dos sinais na saída do OADM.	26
21	Diagrama de olho – OADM	26
22	Multiplexador óptico de inserção e remoção.	26
23	Configuração de OADM que utiliza <i>switch</i> baseado em SOA.	27
24	Espectro dos canais da entrada, removidos, e adicionados respectivamente. .	27

1 Introdução

Comunicação pode ser definido como a transferência (intercâmbio) de informações a partir de um ponto para outro. Em sistemas de fibra óptica esta transferência é efetuada por meio da luz. Ao longo dos últimos anos tem havido um crescimento exponencial na implantação e capacidade das tecnologias dos sistemas comunicação que utilizam fibra óptica. Este crescimento tem sido possível graças ao desenvolvimento de novas tecnologias opto-eletrônicas que podem ser utilizadas para explorar o enorme potencial da banda da fibra óptica. Recentemente a tecnologia WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) surgiu como uma boa solução para os problemas acarretados pelo aumento do tráfego da rede, fazendo com que os enlaces ópticos pudessem ser operados a taxas de transmissão acima de alguns Tb/seg.

A tecnologia óptica é a transportadora de informações a nível mundial. É também fundamental para criação das redes que tentam suprir a crescente demanda de capacidade exigida pelos usuários. Neste contexto de altas demandas por largura de faixa, tornou-se necessário o desenvolvimento de algumas técnicas adequadas para gerenciar o tráfego no próprio domínio óptico através de dispositivos tais como o *OXC* (nó óptico de interligação) e *OADM* (multiplexador óptico de inserção e remoção) utilizados para rotear e comutar os comprimentos de onda desejados.

Muitos dos avanços nas redes ópticas têm sido possíveis graças ao advento dos amplificadores ópticos. Em geral, amplificadores ópticos podem ser divididos em duas classes: amplificadores a fibra e amplificadores a semicondutor. Os amplificadores a fibra tendem a dominar os sistemas convencionais, como em aplicações de amplificação de linha utilizada para compensar as perdas nas fibras. No entanto, devido aos avanços nas técnicas ópticas de fabricação e projeto de dispositivos semicondutores, especialmente nos últimos anos, os amplificadores ópticos a semicondutor (*SOA*) tem-se mostrado promissores para o uso na evolução das redes de comunicações ópticas. O *SOA* pode ser utilizado como um amplificador usual, mas também têm muitas outras aplicações, incluindo *switch* óptico, modulador e conversor de comprimento de ondas entre outros. O presente relatório de estágio supervisionado pretende apresentar os principais conceitos sobre o *SOA*, suas diversas características tais como: ganho, figura de ruído, potência de saída, aplicações, dentre outros, ao ser empregado em uma rede óptica

reconfigurável. A plataforma *OptiSystem 7.0* será utilizada para a simulação desse dispositivo óptico. Na seção 2 é apresentada uma breve descrição do dispositivo. Nas seções 3 e 4 são descritos os princípios da amplificação óptica nos SOAs e suas principais características. Na seção 5 apresenta-se algumas aplicações dos amplificadores ópticos a semicondutor. Na seção 6 é apresentada a ferramenta computacional utilizada e por fim na seção 7 apresentam-se as simulações com os respectivos resultados.

2 Descrição

Um amplificador óptico a semicondutor (*SOA – Semiconductor optical amplifier*) é um dispositivo opto-eletrônico que em condições apropriadas de operação é capaz de amplificar um sinal óptico que o atravessa. É construído, em sua forma mais básica, por uma junção P-N de materiais semicondutores. Um diagrama esquemático de um SOA é apresentado na figura 1. A região ativa dentro do dispositivo fornece um ganho para o sinal de entrada. Uma corrente elétrica externa é que torna possível esse ganho. É usado um guia de onda para manter o sinal se propagando na região ativa, contudo, o confinamento óptico é usualmente fraco, então parte do sinal passa para regiões vizinhas. O sinal de saída é acompanhado por ruído (*ASE – Amplified Spontaneous Emission*), o qual é adicionado pelo próprio processo de amplificação e não pode ser totalmente evitado [1].

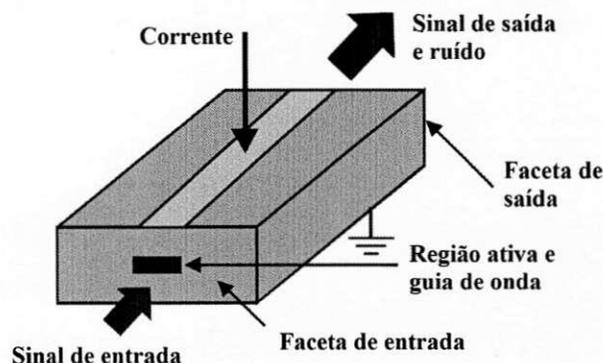


Figura 1: Diagrama esquemático de um SOA [1].

Os SOAs podem ser classificados em dois tipos principais:

- SOA de Fabry-Perot (FP-SOA) onde as reflexões das faces são significativas (i.e. o sinal passa várias vezes pelo amplificador)
- SOA de ondas viajantes ou propagantes (TW-SOA – *Travelling Wave SOA*) onde as reflexões são desprezíveis (i.e. o sinal passa uma única vez pelo amplificador)

A figura 2 mostra os dois tipos de SOA. No FP-SOA o sinal acoplado ao dispositivo é amplificado nas sucessivas passagens pela cavidade. Sua reduzida largura de banda restringe seu uso em enlaces de fibra óptica, tornando-o mais indicado para funções de processamento. O TW-SOA não é tão sensível a flutuações de corrente de polarização, temperatura, e polarização do sinal quanto o FP-SOA. O TW-SOA pode ser polarizado com altas correntes sem apresentar problemas de oscilação e possui maior banda [1].

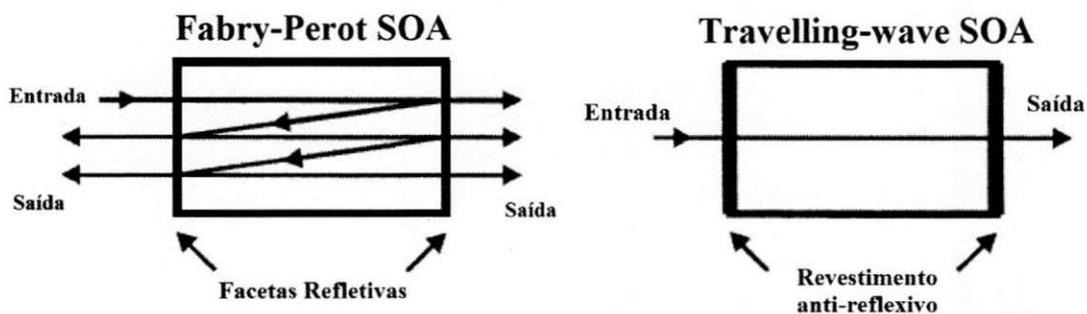


Figura 2: SOA de Fabry-Perot e de ondas viajantes ou propagantes [1].

Para que o SOA opere como um amplificador de ondas viajantes, as faces da região ativa devem possuir camadas anti-reflexivas (AR) para eliminar a cavidade tendo em vista reduzirmos as reflexões internas. Muitos dielétricos podem ser utilizados como AR tais como: SiO_2 , SiN , $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$. Outras soluções são mostradas em [1] tais como:

- Adicionar uma camada de material, dito transparente, entre a camada ativa e as camadas anti-reflexivas
- Separar mecanicamente as ondas de entrada e saída, através da angulação da região ativa

Como pode ser visto na figura 3 (a)-(b).

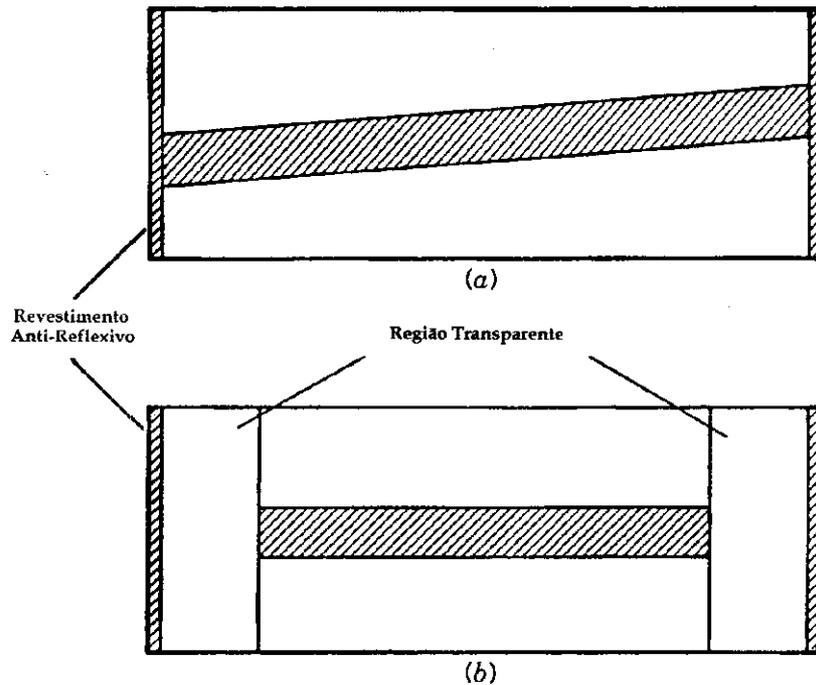


Figura 3: TW-SOA (a) Estrutura de região ativa angulada. (b) Estrutura de material transparente [2].

3 Princípios da amplificação óptica

Em um SOA, elétrons (portadores) são injetados na região ativa através de uma fonte de corrente externa. Esses portadores energizados ocupam a banda de condução (BC) da região ativa do material, criando lacunas na banda de valência (BV). São possíveis em um semiconductor três mecanismos. Estes são mostrados na figura 4 para um material com uma estrutura de bandas de energia que consiste de dois níveis discretos de energia [3].

Na absorção estimulada um fóton de luz incidente com energia suficiente ($E \geq E_2 - E_1$) pode estimular um portador da BV para BC. Esse é um processo de perda já que o fóton incidente é totalmente absorvido [1].

Se um fóton de luz com energia apropriada ($E \geq E_2 - E_1$) incide no semiconductor, isso pode causar uma recombinação estimulada de um portador na BC com uma lacuna na BV. Nessa recombinação dos portadores um fóton de luz é gerado. Esse novo fóton gerado será idêntico em todos os aspectos com o fóton indutor (interação coerente, i.e. fase, frequência e direção idênticas). Ambos os fótons estimulado e original podem

causar outras transições estimuladas. Se a corrente injetada for alta o suficiente para que se obtenha inversão de população, ou seja, a população de portadores na BC se torna maior que na BV, nesse caso a probabilidade da emissão estimulada se torna maior que a absorção estimulada e o semiconductor exibirá ganho óptico [1]. Quando a injeção de corrente é pequena ou nula, o SOA funciona como um detector, pois absorve todos os fótons incidentes e os converte em sinais elétricos.

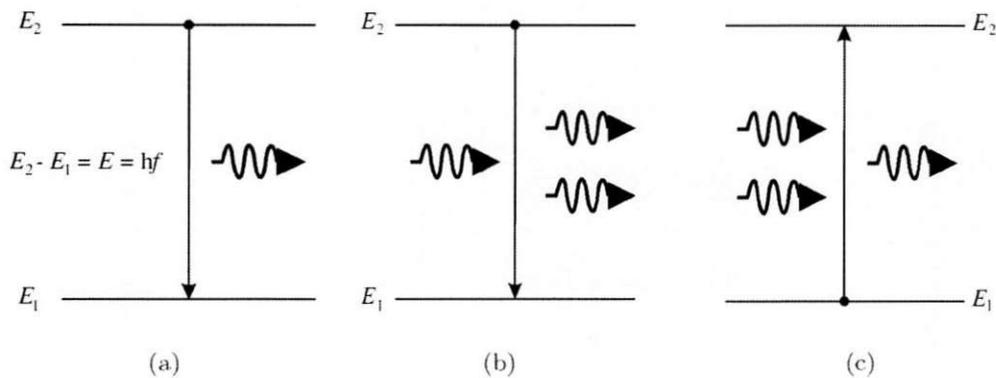


Figura 4: Mecanismos que ocorrem entre dois níveis de energia (a) Emissão Espontânea. (b) Emissão Estimulada. (c) Absorção [3].

No processo de emissão espontânea, existe uma probabilidade por unidade de tempo (maior que zero) que portadores da BC espontaneamente se recombinem com as lacunas da BV e assim sejam emitidos fótons com fase e direção aleatórias. Os fótons emitidos espontaneamente têm uma larga faixa de frequência. Fótons de emissão espontânea são essencialmente ruído e também reduzem a população de portadores designados para o ganho óptico. A emissão espontânea é uma consequência direta do processo de amplificação e não pode ser evitada. Pode se reduzir o ruído aumentando o nível de inversão de população ou utilizando um filtro óptico. O processo estimulado é proporcional à intensidade do sinal, já que o processo de emissão espontânea independe disto [1].

4 Características fundamentais do dispositivo

A aplicação mais comum de um SOA é como um bloco básico de ganho óptico. Para esse tipo de aplicação, algumas propriedades são desejáveis e listadas na tabela 1 .

Propriedades
Alto ganho e alta largura de banda do ganho
Baixa sensibilidade a polarização
Alta saturação da potência de saída
Baixas não linearidades
Amplificação multicanal sem <i>crosstalk</i>

Tabela 1 – Propriedades desejáveis de um SOA

4.1 Ganho de pequenos sinais e largura de banda

Em geral existem duas definições básicas de ganho para os SOAs. A primeira é o ganho intrínseco G do SOA, que é simplesmente a razão da potência do sinal de saída pela potência de entrada. A segunda definição é o ganho fibra a fibra, que inclui as perdas de acoplamento de entrada e saída. O espectro de ganho de um SOA depende de sua estrutura, material e parâmetros de operação. O ganho interno para pequenos sinais (pequenos sinais significam que a influência destes sinais no coeficiente de ganho é desprezível) para um FP-SOA operando na frequência ν é dado por [1]:

$$G(\nu) = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)G_s}{(1 - \sqrt{R_1 R_2} G_s)^2 + 4\sqrt{R_1 R_2} G_s \text{sen}^2[\pi(\nu - \nu_o)/\Delta\nu]} \quad (1)$$

onde R_1 e R_2 são as refletividades das faces de entrada e saída, $G_s = e^{gL}$ é o ganho de passagem única, isto é, sem que ocorra a realimentação da cavidade. $\Delta\nu$ é o espaçamento entre os modos longitudinais da cavidade dado por:

$$\Delta\nu = \frac{c}{2Ln_r} \quad (2)$$

O parâmetro ν_o é a ressonância mais próxima de ν . Frequências de ressonância ocorrem em múltiplos inteiros de $\Delta\nu$. O fator sen^2 é igual a zero na ressonância e igual à unidade nas frequências anti-ressonantes (localizadas entre as frequências de ressonâncias adjacentes) [1]. O coeficiente de ganho efetivo do SOA é dado por:

$$g = \Gamma g_m - \alpha \quad (3)$$

onde Γ é o fator de confinamento óptico (fração do sinal propagante confinado na região ativa), α é o coeficiente de absorção, e g_m é o ganho material [1].

4.2 Saturação do ganho

O ganho do SOA é influenciado por ambos, a potência do sinal de entrada e o ruído interno gerado pelo processo de amplificação. Com o aumento da potência do sinal de entrada, há um aumento dos portadores na região ativa. Isso leva a uma diminuição do ganho, chamada de saturação do ganho. Essa saturação do ganho pode causar distorção significativa do sinal. Uma típica relação entre ganho do SOA e a potência de saída do sinal é mostrada na figura 5 abaixo. Na figura está mostrado o parâmetro usado para quantificar a saturação do ganho que é a potência de saturação do SOA, P_{sat} . Esta potência é definida como a potência do sinal de entrada quando metade do ganho (queda de 3 dB) é obtida para pequenos sinais ou a partir do valor de ganho saturado. Para dispositivos práticos os valores típicos estão na faixa de 5 a 20 dBm [1].

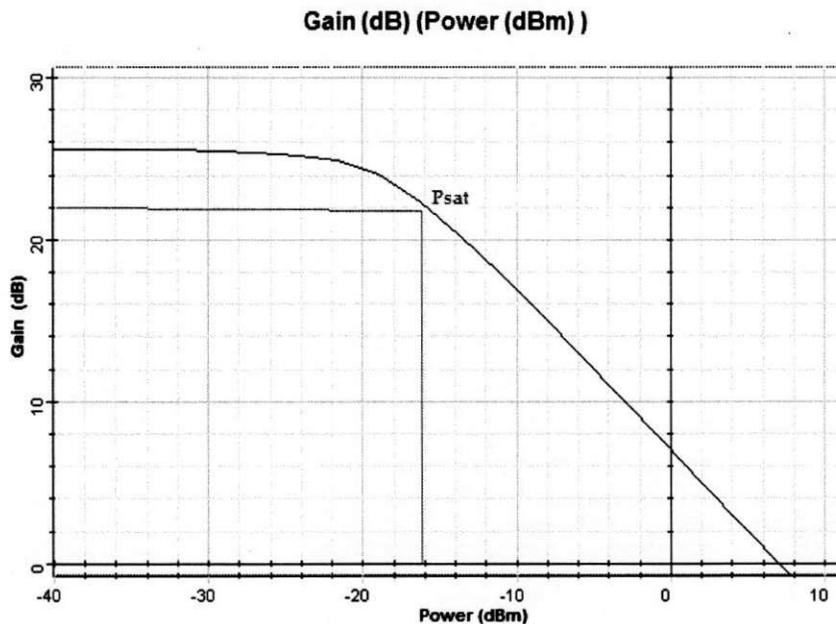


Figura 5: Ganho (dB) versus Potência de entrada (dBm).

Um aumento de 4.9 dB na potência de saturação pode ser conseguido através da injeção de um sinal contínuo de bombeio (*CW pump*) junto com o sinal de entrada [4].

4.3 Sensibilidade à polarização

Em geral, o ganho de um SOA depende do estado de polarização do sinal de entrada. Essa dependência é devido a um número de fatores como a estrutura do guia de onda, do revestimento anti-reflexivo e do ganho do material. Dispositivos em série atenuam sua dependência com a polarização. O guia de onda do amplificador é caracterizado por dois modos mutuamente ortogonais denominados modo transverso elétrico (TE) e modo transverso magnético (TM). A polarização do sinal de entrada geralmente está em algum lugar entre esses dois extremos. A sensibilidade à polarização de um SOA é definida como a magnitude da diferença entre o ganho do modo TE e o ganho do modo TM [1].

4.4 Figura de Ruído

Um parâmetro usual para a quantificação do ruído de um amplificador óptico é a figura de ruído, NF (*Noise Figure*), que é definida, como a razão entre a relação sinal/ruído de entrada e a relação de sinal/ruído de saída, isto é [1]:

$$NF = \frac{(S/N)_e}{(S/N)_s} \quad (4)$$

As relações sinal/ruído em (4) são aquelas obtidas quando as potências de entrada e da saída do amplificador são detectadas por um fotodetector ideal. Valores típicos de NF são entre 7 a 12 dB. Esta é degradada pelas perdas de acoplamento da entrada/saída do amplificador [1].

4.5 Não Linearidades

Os SOAs podem apresentar comportamento não linear. Em geral, essas não linearidades podem causar problemas tais como desvio de frequência (*Chirp*) e geração de intermodulações de segunda ou terceira ordem, ou seja, modulação de ganho, fase e geração de novas componentes espectrais.

Entretanto, as não linearidades nos SOAs são principalmente causadas pelas mudanças na densidade de portadores induzida pela potência de entrada do amplificador. Os principais tipos de não linearidades dos SOAs são: Mistura de quatro ondas (*FWM* -

Four-Wave Mixing), modulação de fase cruzada (*XPM - Cross Phase Modulation*) e a modulação de ganho cruzado (*XGM - Cross Gain Modulation*).

4.5.1 Mistura de quatro ondas

Quando algumas frequências ópticas (f_1, f_2, f_3, \dots) interagem em um meio não linear, eles dão origem a várias componentes espectrais (f_n), que está relacionada com as demais pela seguinte relação:

$$f_n = f_1 \pm f_2 \pm f_3 \dots \quad (5)$$

Este processo paramétrico é conhecido como mistura de quatro ondas (*FWM*) e é uma característica da fibra óptica que afeta sistemas multicanais. Esta nova frequência óptica f_4 penaliza o sistema se ela for igual ou próxima de um canal existente, tal que o ruído interferente caia dentro da largura de banda do receptor. Alta dispersão cromática aumenta os efeitos de *FWM* [5]. A figura 6 ilustra esse fenômeno.

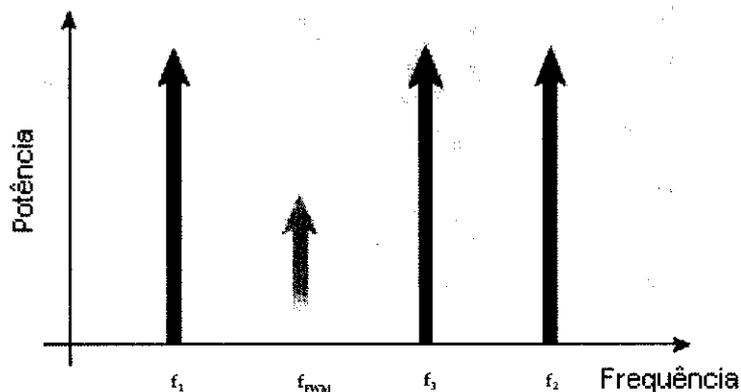


Figura 6: Geração de mistura de quatro ondas [5].

4.5.2 Modulação de Fase Cruzada

A modulação de fase cruzada (*XPM*) é o deslocamento de fase de um sinal causado pelas flutuações de intensidade de outros canais que compartilham a mesma fibra usam diferentes frequências. A não linearidade do índice de refração de um meio pode acoplar dois campos eletromagnéticos sem causar transferência de energia entre eles [6], caracterizando assim o fenômeno *XPM*.

A modulação de fase cruzada pode ser relevante sob diversas circunstâncias. Em sistemas de comunicações ópticas ela pode acarretar em *crosstalk*. Entretanto a XPM também pode ser utilizado para algumas aplicações dentre elas: comutação óptica, conversão de comprimentos de onda. Diversos esquemas interferométricos têm sido utilizados para tirar proveito da modulação de fase cruzada para comutação óptica [14].

4.5.3 Modulação de ganho cruzado

Um sinal modulado em intensidade no comprimento de onda λ_1 é injetado no SOA junto com um sinal cw (*continuous wave*) de bombeio no comprimento de onda λ_2 e modifica o ganho do amplificador. A potência do sinal cw deve ser alta o suficiente para provocar a compressão do ganho do SOA. Essa compressão do ganho resulta da depleção causada pela emissão estimulada na presença de uma fonte de potência elevada. A modulação do ganho causada pelo sinal de entrada modula o sinal de bombeio no comprimento de onda de saída (λ_2), como pode ser visto na figura 7 [7].

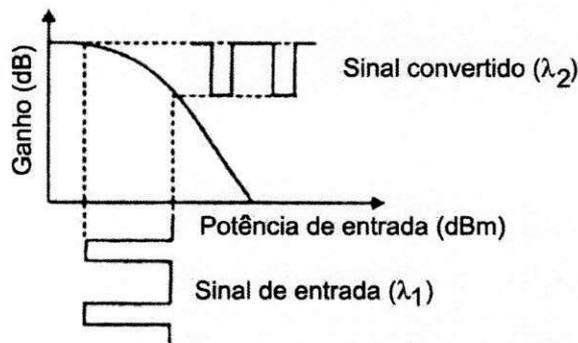


Figura 7: Ilustração XGM [7].

O sinal convertido tem a sua lógica invertida quando comparado ao sinal de entrada [1].

5 Aplicações

5.1 Aplicações básicas

O SOA tem potencial para as redes de telecomunicações, apresentando diversas aplicações, devido ao seu tamanho compacto e seu baixo-custo de implementação. As principais aplicações dos SOAs em sistemas de comunicações ópticas podem ser classificadas em três formas básicas: amplificador de potência (*booster*) para aumentar a potência do sinal a ser transmitido, amplificador de linha utilizado para compensar as perdas nos sistemas de longo alcance e como pré-amplificador para melhorar a sensibilidade do receptor. A figura 8 abaixo mostra as três aplicações [1].

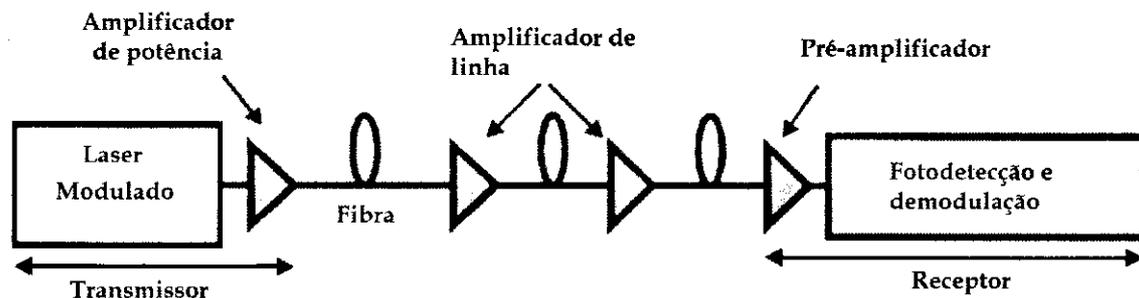


Figura 8: Aplicação do SOA como amplificador de potência, amplificador de linha e pré-amplificador [1].

Para que os SOAs sejam utilizados nestas aplicações, alguns requisitos são necessários para cada uma delas como mostrado na tabela 2 [1].

	Amplificador booster	Amplificador de linha	Pré-amplificador
Alto Ganho	SIM	SIM	SIM
Alta potência de saturação	SIM	SIM	DISPENSÁVEL

Baixa figura de ruído	DISPENSÁVEL	SIM	SIM
Baixa sensibilidade a polarização	DISPENSÁVEL	SIM	SIM
Baixa perda de inserção	DISPENSÁVEL	SIM	SIM
Filtro óptico	SEM NECESSIDADE	DISPENSÁVEL	SIM
Isolador óptico	SIM	DISPENSÁVEL	DISPENSÁVEL

Tabela 2: Requisitos dos amplificadores ópticos nos sistemas de transmissão ópticos [1].

5.2 Aplicações funcionais

Além das aplicações básicas descritas anteriormente, os SOAs também pode ser utilizados para executar funções que são particularmente úteis nas redes ópticas transparentes. Estas funções totalmente ópticas podem ajudar a superar o “gargalo eletrônico”, onde o processamento do sinal é feito no domínio elétrico. Este é um fator limitante na implantação de altas taxas de transmissão nas redes de comunicações ópticas. Muitas destas aplicações funcionais do SOA são baseadas em suas não linearidades. A tabela 3 abaixo apresenta algumas destas aplicações [1].

Aplicações funcionais
Modulador de intensidade e fase
Conversor de comprimento de onda
<i>Switch</i> óptico
Porta lógica
Multiplexador de inserção/remoção
Filtro sintonizável
Gerador de pulsos
Recuperador de relógio
Compensador de dispersão
Detector

Tabela 3: Aplicações funcionais dos SOAs [1].

A seguir algumas destas aplicações serão apresentadas.

5.2.1 Conversor de comprimento de onda

Conversores de comprimento de onda baseados em amplificadores ópticos a semicondutor são de construção simples e por isso são os mais utilizados. Esta conversão pode ser obtida através de duas técnicas: o chaveamento óptico e mistura de quatro ondas. No chaveamento óptico, a conversão pode ser feita pelas técnicas de *XGM* e *XPM* [8], [9]. Nestes casos, os SOAs, têm algumas de suas características físicas (o ganho do amplificador e o índice de refração da região ativa do amplificador) dependentes da potência do sinal de entrada, o que gera uma variação na amplitude ou na fase do sinal. Neste tipo de técnica um sinal de onda contínua (*cw*) passa pelo SOA e é submetido à variação do ganho ou índice de refração imposta pelo sinal de entrada, o que gera no sinal *cw* uma variação correlacionada com o sinal de entrada [7].

A conversão de comprimento de onda em SOAs usando a técnica de conversão por mistura de quatro ondas é realizada através dos efeitos não lineares de *FWM* e geração por diferença de frequências [10], [11]. O resultado da mistura é a geração de uma nova componente espectral que tem a intensidade proporcional às ondas iniciais.

5.2.2 Switch óptico

Devido às altas taxas de transmissão utilizadas nas redes ópticas de comunicações, há uma exigência que sejam utilizados *switches* que possam ser controlados eletronicamente ou opticamente como mostrados na figura 9. Esses *switches* formam a base dos componentes ópticos tais como: multiplexadores/demultiplexadores de inserção e remoção, portas lógicas. *Switches* construídos utilizando SOA podem ser postos em série e são rápidos sob o ponto de vista de chaveamento [1].

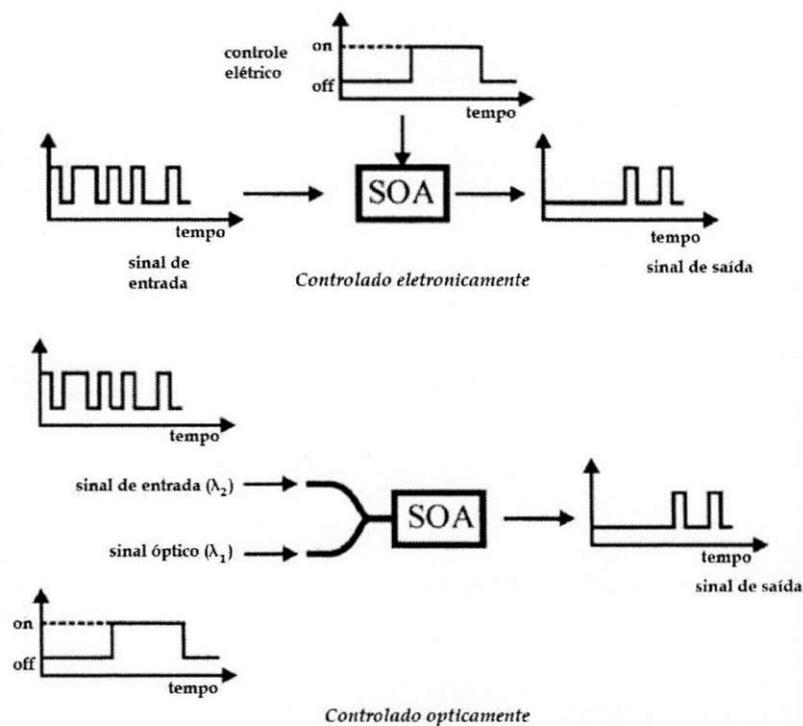


Figura 9: (a) *Switch* controlado eletronicamente. (b) *Switch* controlado opticamente [1].

Diversos esquemas de *switches* são descritos em [1], porém podemos destacar a configuração baseada no interferômetro de mach-zehnder (MZI). O princípio básico é utilizar um sinal óptico de controle para modificar a densidade de portadores do SOA localizado em um dos braços do interferômetro. Isso causa uma mudança no índice de refração, e também uma mudança de fase do sinal de dados que passa pelo outro braço do interferômetro. O MZI simétrico é mostrado na figura 10. Esta configuração será simulada no software *Optisystem 7.0* e a partir dela serão construídos e simulados os multiplexadores ópticos de inserção e remoção (*OADM*).

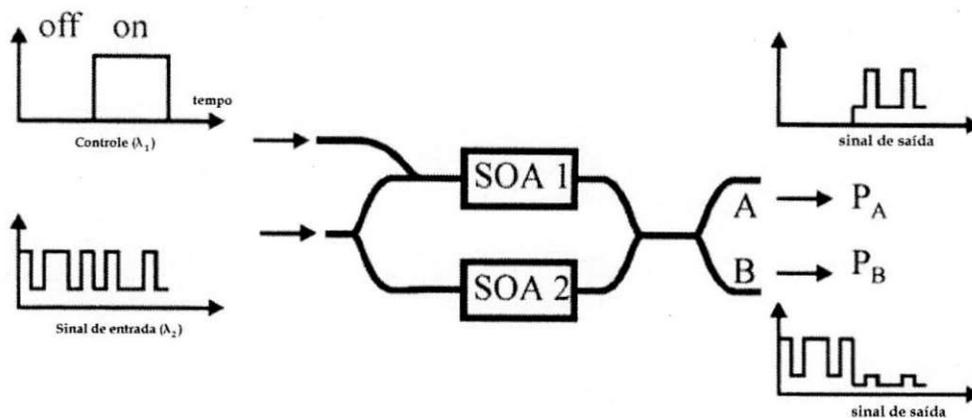


Figura 10: *Switch* baseado no MZI simétrico [1].

5.2.3 Multiplexadores ópticos de inserção e remoção (OADM)

Para reduzirmos o custo de uma rede óptica o uso de multiplexadores ópticos de inserção e remoção se torna indispensável. A habilidade de adicionar e remover canais em redes WDM é útil para o roteamento de comprimentos de onda. A função de um OADM é separar um canal sem interferir nos demais canais adjacentes [1]. A figura 11 representa a estrutura básica de um OADM.

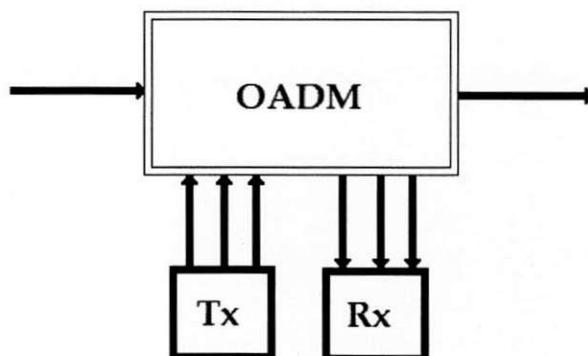


Figura 11: Estrutura básica de um OADM.

Utilizando um filtro refletor, um SOA e um circulador pode-se construir um OADM [12]. O comprimento de onda selecionado é refletido pelo filtro, amplificado pelo SOA e extraído através da porta de remoção do circulador. Os demais canais passam pelo filtro e o único problema será o de adicionar o novo comprimento de onda [1]. A configuração mostrada na figura 12 foi simulada utilizando o software.

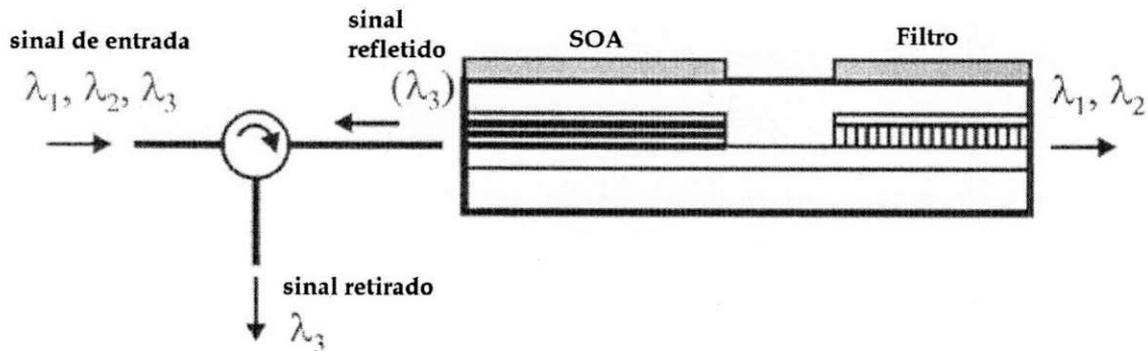


Figura 12: OADM que utiliza um filtro refletivo [1].

6 Ferramenta de simulação

6.1 O software Optisystem 7.0

A ferramenta computacional utilizada neste trabalho é o software *Optisystem 7.0TM* da empresa *Optiwave System Inc.* É uma ferramenta de software bastante avançada que permite projetar, analisar e otimizar de forma virtual qualquer tipo de enlace de fibra óptica no nível de camada física. Possui uma interface gráfica com o usuário (*Graphical User Interface - GUI*) amigável e de fácil compreensão que controla o *layout*, componentes ópticos, modelos de componentes e apresentação de gráficos [13]. A figura 13 apresenta a GUI do *Optisystem*.

O software contém uma extensa biblioteca de componentes ativos e passivos, do domínio óptico e elétrico, que reproduzem fielmente o comportamento real, de dispositivos reais. 400 componentes estão dispostos para o uso tais como: lasers, moduladores, multiplexadores/demultiplexadores, fibras ópticas, acopladores, amplificadores, filtros etc. A figura 14 mostra a biblioteca de componentes do *Optisystem* [13].

Importantes ferramentas de visualização de gráficos que permitem analisar o desempenho do sistema no domínio óptico e elétrico, tais como osciloscópio, analisadores de espectro, analisadores de BER e diagrama de olho estão disponíveis na biblioteca de componentes.

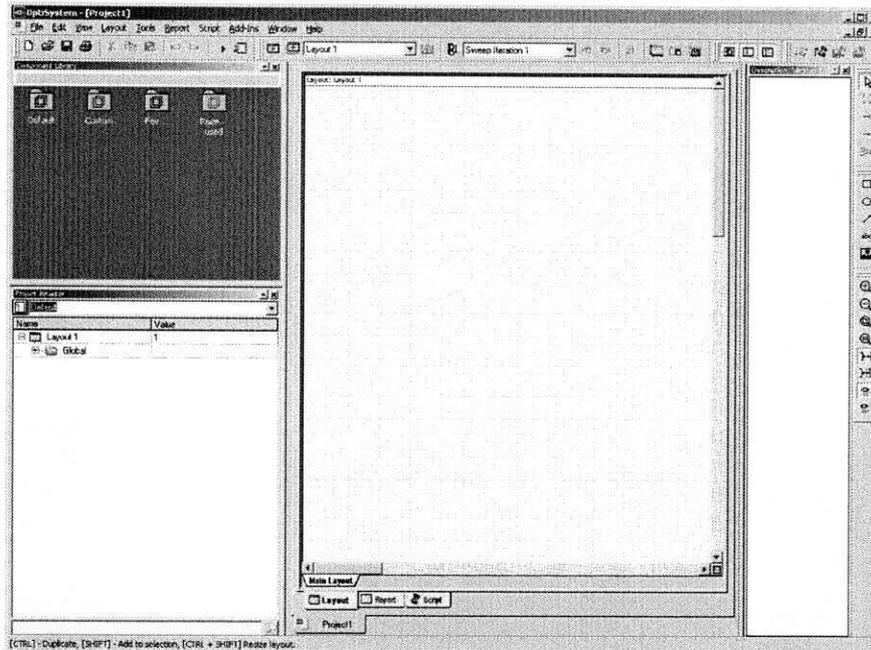


Figura 13: Interface Gráfica do Optisystem 7.0 [13].

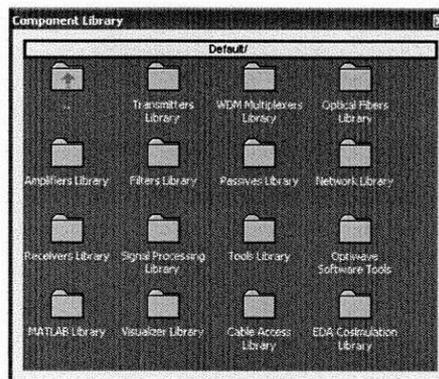


Figura 14: Biblioteca de componentes do *Optisystem* [13].

7 Simulações

As simulações realizadas utilizaram como referência os modelos apresentados por [1]. O valor das variáveis dos dispositivos serão sempre o *default* do *Optisystem*. Primeiramente foi simulado o *switch* baseado na configuração simétrica MZI. Em seguida são apresentadas as simulações de duas configurações de OADM.

7.1 Switch Óptico

Iniciamos a simulação com a construção de um transmissor óptico. Foi utilizada modulação externa, através do modulador de *Mach-Zehnder* de braço único. Dois valores de taxas de transmissão foram simulados 1 Gbps e 10 Gbps. A figura 15 mostra o transmissor utilizado. As frequências utilizadas pelos transmissores foram de 193.1 Thz e 193.5 Thz respectivamente.

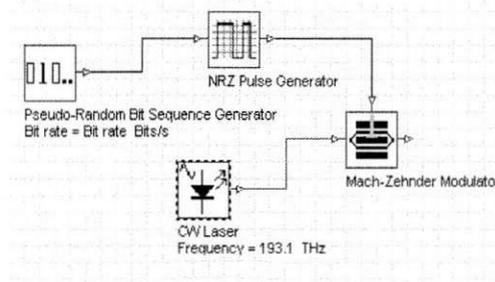


Figura 15: Configuração do transmissor

Em seguida foram inseridos os acopladores e os amplificadores ópticos a semicondutor para compor a estrutura do *switch*. Na figura 16 é mostrada a configuração completa do *switch* óptico. Os resultados obtidos foram observados através de analisadores ópticos de espectro.

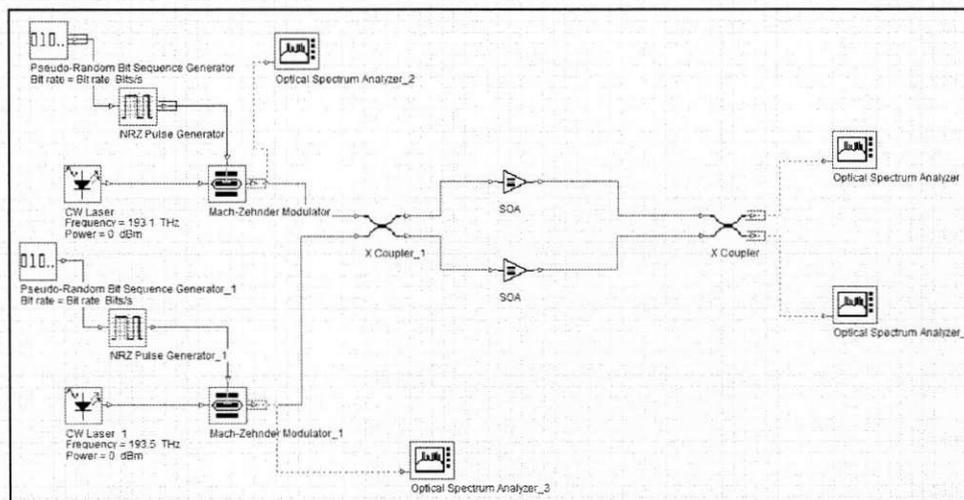


Figura 16: *Switch* óptico

As figuras 17 e 18 apresentam os espectros dos resultados obtidos para 1 Gbps e 10

Gbps, respectivamente.

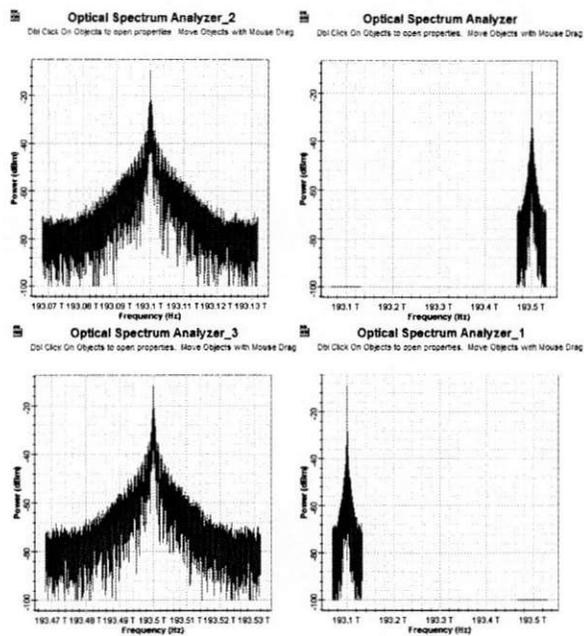


Figura 17: Espectro do sinal na entrada e saída do *switch* óptico a 1 Gbps.

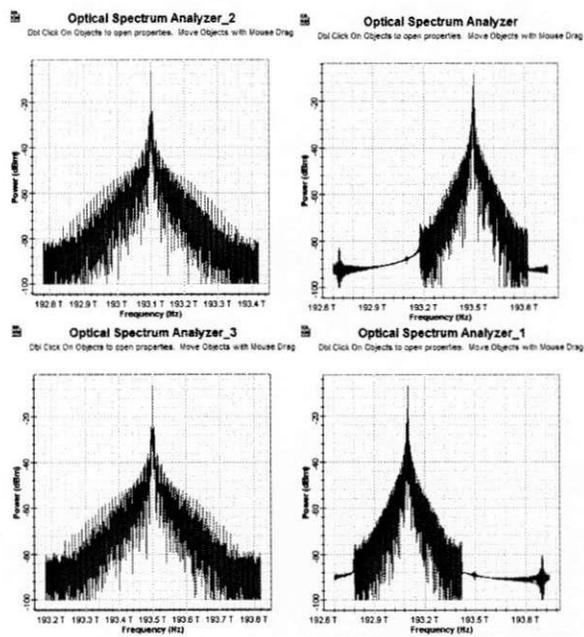


Figura 18: Espectro do sinal de entrada e saída do *switch* óptico a 10 Gbps.

Como podemos observar nas figuras 17 e 18 houve a comutação cruzada dos canais. Um fator que irá limitar a comutação dos canais com este tipo de configuração será

a taxa de transmissão, pois caso a mesma seja aumentada iremos ter um alargamento do sinal. E ao utilizarmos canais com pequeno espaçamento haverá uma sobreposição dos sinais ocasionando numa não distinção dos mesmos.

7.2 Multiplexador óptico de inserção e remoção (OADM)

Em seguida houve a simulação de duas estruturas de OADM. A primeira estrutura simulada foi apresentada na figura 12 [12]. Para a simulação foram utilizados quatro transmissores com frequências centradas entre 193.1 Thz a 193.4 Thz. Os sinais foram multiplexados para serem transmitidos. O canal selecionado para ser removido foi o de frequência igual a 193.4 Thz. Na figura 19 está a estrutura implementada no *Optisystem*. Os resultados obtidos foram analisados através de analisadores ópticos de espectro e do diagrama de olho.

O espectro do canal removido do sinal de entrada e dos demais canais são apresentados na figura 20. A figura 21 indica o diagrama de olho da configuração.

Observando o espectro dos canais adjacentes é visto que estes não sofreram nenhuma alteração. Através do diagrama de olho e da taxa de erro de bit (*BER*) temos uma medida da qualidade do nosso sistema e ao analisarmos a *BER* vimos que o valor encontrado foi zero. Ou seja, ao utilizarmos este tipo de configuração de OADM não irá haver um aumento da *BER* nem estreitamento do diagrama de olho.

Outra configuração foi vista no tutorial do *Optisystem* e serviu como ponto de partida para a criação de um modelo semelhante. A estrutura utiliza *switches* ópticos controlados eletronicamente. Para a simulação foi feita a troca desses *switches* pelo modelo de *switch* óptico feito a base de SOA mostrado anteriormente. A figura 22 mostra a configuração do OADM.

Foram utilizados *WDM add/drop frequency* para adicionar e remover respectivamente os canais desejados. Na figura 23 têm-se a configuração simulada. Oito transmissores com frequência variando de 193.1 Thz a 193.8 Thz semelhantes aos mostrados anteriormente foram utilizados. Os canais selecionados para ser removidos e adicionados foram 193.1 a 193.4 Thz e 193.5 a 193.8 Thz respectivamente.

Na entrada do OADM primeiramente os canais irão passar por *WDM drop frequency* cuja função é de remover a frequência escolhida. A saída de cada *WDM drop* está

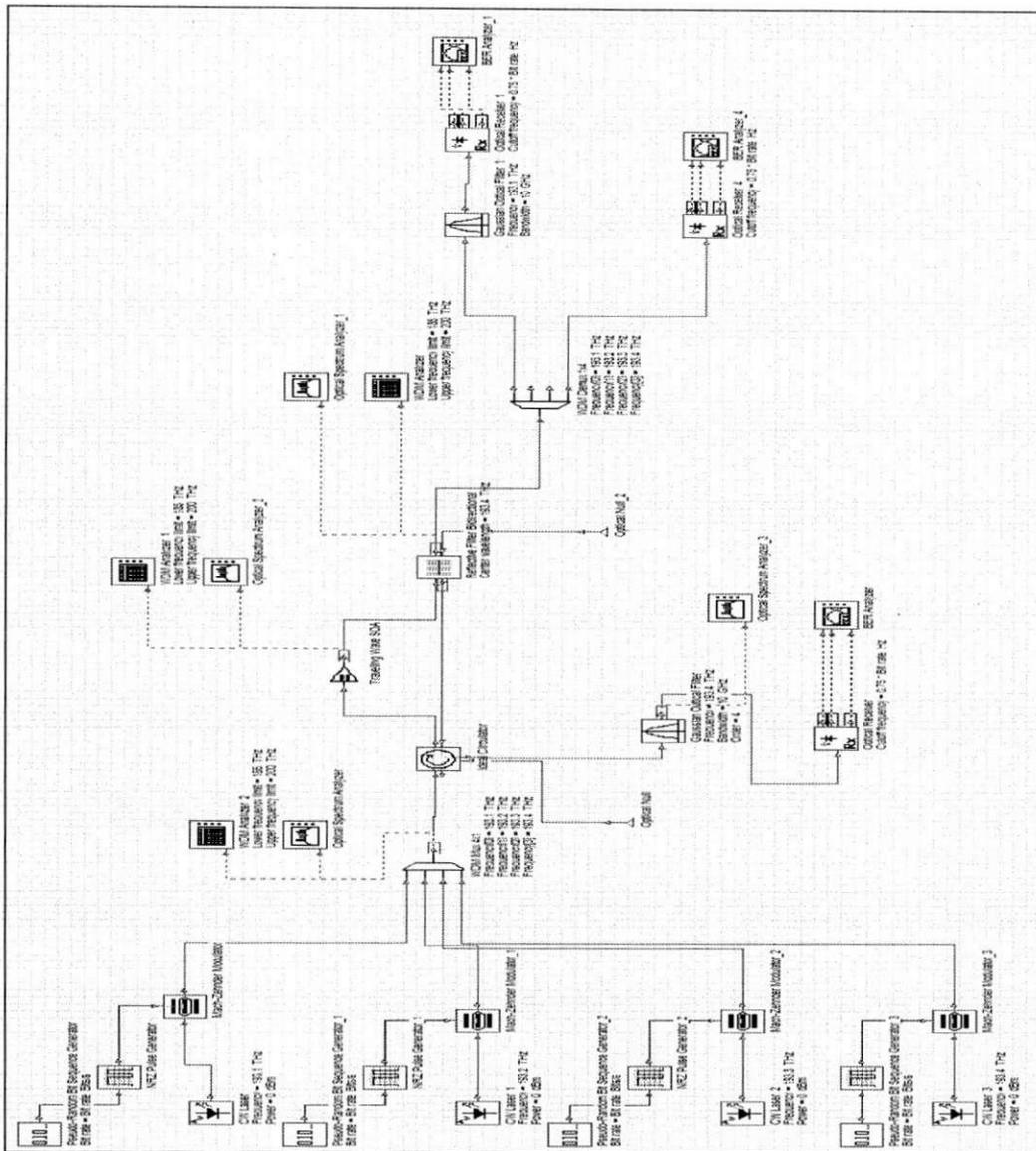


Figura 19: Estrutura do OADM que utiliza um filtro refletivo [12].

ligada a um determinado *switch* que tem a função de comutar a frequência que desejamos adicionar com a frequência a ser retirada. Em seguida são utilizados *WDM add frequency* que para agrupar os sinais. Na figura 24 são mostrados os espectros dos sinais. Esta estrutura pode ser estendida para a construção de um OADM 8x8, 16x16.

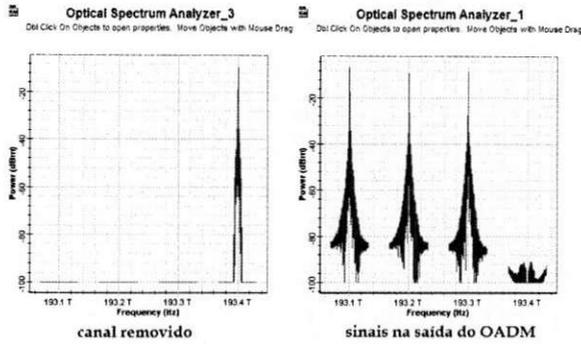


Figura 20: Espectro do canal removido e dos sinais na saída do OADM.

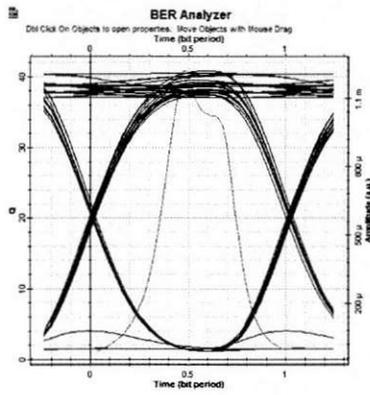


Figura 21: Diagrama de olho – OADM

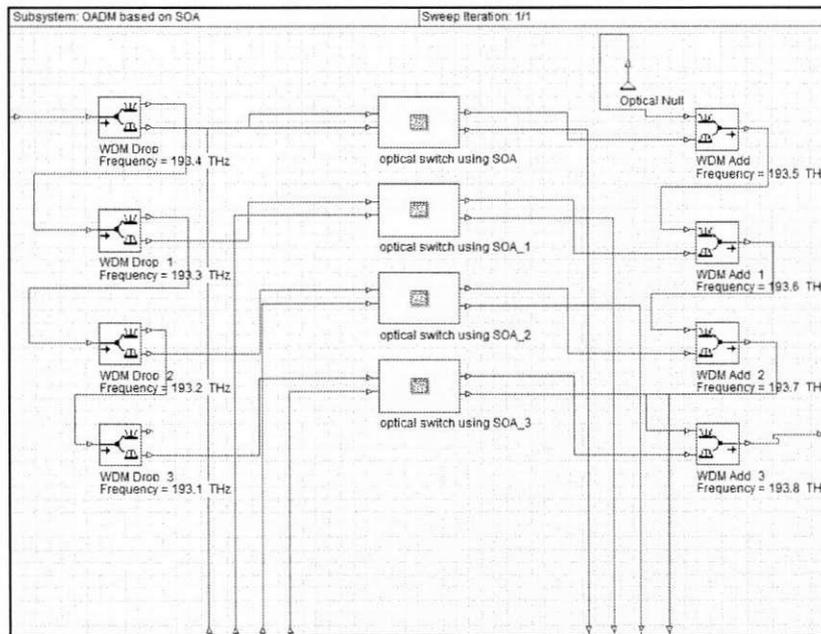


Figura 22: Multiplexador óptico de inserção e remoção.

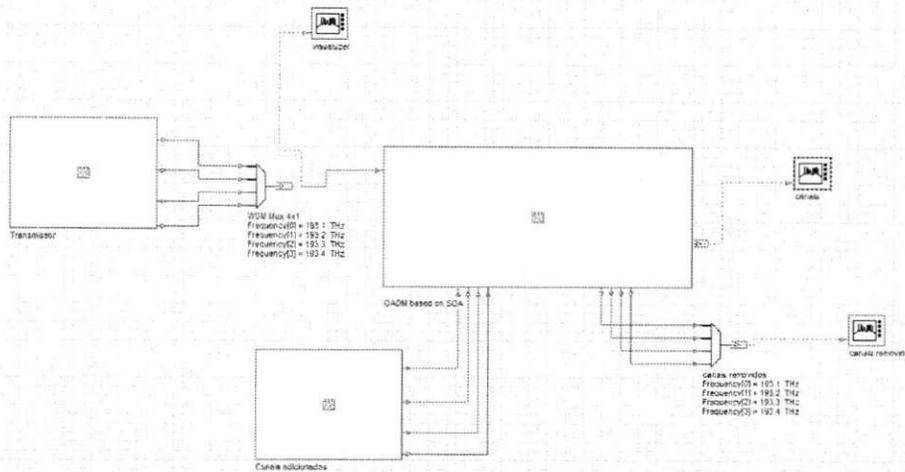


Figura 23: Configuração de OADM que utiliza *switch* baseado em SOA.

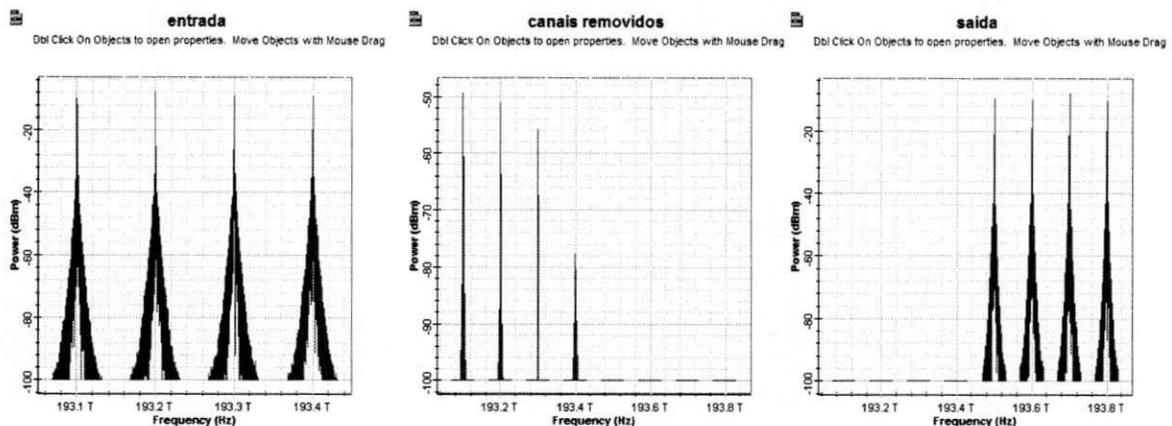


Figura 24: Espectro dos canais da entrada, removidos, e adicionados respectivamente.

8 Conclusão

O SOA têm potencial como um amplificador compacto, de baixo custo para redes de telecomunicações. Uma série de novas aplicações está emergindo as quais distintas características do SOA estão excepcionalmente adaptadas: amplificação CWDM, utilizando a estendida cobertura de comprimento de onda do SOA devido à sua ampla variação de pico do ganho; redes dinâmicas com adição/remoção de canais, amplificadores por SOA's em regime linear de ganho; e por último a comutação óptica de pacotes, dada pela capacidade da escala de tempo de nanosegundos.

Aqui foram abordados os principais conceitos acerca dos SOAs, tais como: saturação do ganho, figura de ruído, não linearidades, aplicações. Foi dado maior enfoque ao OADM

por ser um dispositivo que vem sendo largamente utilizado em redes ópticas transparentes. A utilização do software foi de grande proveito para vermos uma demonstração do que pode ser implementado fisicamente.

Este texto está sendo elaborado, alguns tópicos ainda não foram completamente revisados, o autor (ecmagalhaes@gmail.com) agradece, antecipadamente, todas e quaisquer, críticas, sugestões e correções que nos forem enviadas, no sentido de melhorar o presente texto.

9 Referências Bibliográficas

- [1] CONNELLY, M. J. Semiconductor Optical Amplifier. Kluwer Academic Publishers, 2002
- [2] AGRAWAL, G. P. Fiber-Optical Communication Systems. 3ª ed. Wiley- Interscience, 2002
- [3] GHAFOURI-SHIRAZ, h. the Principles of semiconductor laser diodes and amplifiers Analysis and Transmission Line Laser Modeling, 2004
- [4] YOSHINO, M., INOUE. K., Improvement of saturation output power in a semiconductor laser amplifier through pumping light injection, IEEE Photon. Technol. Lett., 8, 58-59 (1996)
- [5] ALWAYN, V. , CCIE Nº 2995. "Optical Network Design and Implementation". Cisco Press. 2004
- [6] KAMINOW, I. , LIE, T. "Optical Fiber Telecommunications – Systems and Impairments IVB". Academic Press. 2002
- [7] YOO, S. J. B. Wavelength Conversion Technologies for WDM Network Applications. Jornal of Lighthwave Technology. 14(6): 955 – 966, Junho 1996
- [8] OBERMANN, K., KINDT, S., BREUER, D., PETERMANN, K.,SCHMIDT, C., DIEZ, S., WEBER, H.G. , Noise characteristics of semiconductor-optical amplifiers used for wavelength conversion via cross-gain and cross-phase modulation, IEEE Photon. Technol. Lett., 9, 312-314 (1997).
- [9] MARCENAC, D.D., KELLY, A.E., NESSET, D., DAVIES, D.A.O., Bandwidth enhancement of wavelength conversion via cross-gain modulation by semiconductor optical amplifier cascade, Electron. Lett., 31, 1442-1443 (1995).
- [10] DIEZ, S., SCHMIDT, C., LUDWIG, R., WEBER, H.G., OBERMANN, K., KINDT, S., KOLTCHANOV, I., PETERMANN, K., Four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers for frequency conversion and fast optical switching, IEEE J. Sel. Topics in Quantum Electron., 3, 1131-1145(1997).
- [11] GERAGHTY, D.F., LEE, R.B., VERDIELL, M., ZIARI, M., MATHUR, A., VAHALA, K.J., Wavelength conversion for WDM communication systems using four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers, IEEE J. Sel. Topics in Quantum Electron., 3, 1146-1155 (1997).

- [12] RAYBON, G., KOREN, U., MILLER, B.I., CHIEN, M., YOUNG, M.G., CAPIK, R.J., DREYER, K., DEROSIER, R.M., A wavelength-tunable semiconductor amplifier/filter for add/drop multiplexing in WDM networks, IEEE Photon. Technol. Lett., 9, 40-42 (1997)
- [13] Manual do software Optisystem 7.0TM. Optiwave Systems Inc
- [14] AGRAWAL, G. P. Non Linear Fiber Optics. 3^a ed. Academic Press, 2001