

**Greter Capote Mastrapa**

**Controle de potência de saturação de  
amplificadores ópticos semicondutores em  
regime pulsado**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Jean Pierre von der Weid

Rio de Janeiro  
Abril de 2015



**Greter Capote Mastrapa**

**Controle de potência de saturação de  
amplificadores ópticos semicondutores em  
regime pulsado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Jean Pierre von der Weid**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

**Prof. Guilherme Penello Temporão**

Centro de Estudos em Telecomunicações — PUC-Rio

**Prof. Giancarlo Vilela de Faria**

Departamento de Engenharia Mecânica — PUC-Rio

**Prof. Rogério Passy**

MLS Wireless

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de Abril de 2015

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

### **Greter Capote Mastrapa**

Graduou-se em Engenharia de Telecomunicações e Eletrônica na Universidad de Oriente (Santiago de Cuba , Cuba).

#### Ficha Catalográfica

Capote Mastrapa, Greter

Controle de potência de saturação de amplificadores ópticos semicondutores em regime pulsado/ Greter Capote Mastrapa; orientador: Jean Pierre von der Weid . — Rio de Janeiro : PUC–Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2015.

51 f: il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2015.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Amplificação óptica. 3. SOA . 4. OTDR. 5. Fibra óptica. 6. Ganho. I. von der Weid, Jean Pierre (Orientador). II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

De forma muito especial quero dedicar este sonho cumprido a minha mãe Ana Gloria Mastrapa que tem sido um exemplo de luta, superação e perseverança.

A você, amorosamente dedico esta vitória, porque me ensinou com humildade e carinho que nos momentos mais difíceis é quando devo ser mais forte, persistente e corajosa.

## Agradecimentos

Esta dissertação de mestrado é o resultado de meus últimos dois anos de pesquisa no Centro de Estudos de Telecomunicações (CETUC), onde através de esforço e sacrifício eu atinjo mais uma etapa neste processo de aperfeiçoamento acadêmico. É por isso que desejo primeiramente, dar infinitas graças a **DEUS** por estar comigo em cada passo que dou, por fortalecer meu coração e iluminar minha mente neste árduo caminho de aprendizado.

Quero expressar minha mais sincera gratidão ao meu orientador Jean Pierre von der Weid, pela amizade, pela orientação, por sempre mostrar boa vontade e pelo tempo dedicado ao projeto.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional.

A meu irmão Gil por todo o apoio, paciência e carinho.

Aos meus amigos do CETUC, por seu apoio e ajuda neste longo período de tempo, e por tornar o dia-a-dia mais suportável.

Finalmente, gostaria de agradecer o apoio financeiro provido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

## Resumo

Capote Mastrapa, Greter; von der Weid, Jean Pierre (Orientador). **Controle de potência de saturação de amplificadores ópticos semicondutores em regime pulsado**. Rio de Janeiro, 2015. 50p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A crescente demanda do uso de sistemas de comunicação óptica, seja pelo aumento do número de usuários ou pela quantidade de informação enviada, requer um aumento substancial na necessidade de desenvolvimento de novos sistemas e componentes. A reflectometria óptica no domínio do tempo (OTDR) é a técnica mais empregada para detecção de falhas em enlaces de fibra óptica. Em alguns tipos de rede óptica, como é o caso das redes ópticas passivas (PONs), as perdas nos enlaces são muito elevadas devido à presença de splitters, que dividem o sinal para cada usuário (no cenário FTTH) ou cada grupo de usuários (FTTB / FTTA), o que diminui consideravelmente a máxima distância atingida pelo OTDR. Em termos de componentes aplicados à comunicação óptica, aqueles utilizados para a amplificação óptica são de grande importância. Entre eles estão presentes os amplificadores ópticos de semicondutores. Uma forma de vencer as limitações impostas pelas altas perdas está no emprego de um amplificador óptico semiconductor (SOA), que ao mesmo tempo amplifica o sinal e funciona como uma chave, inibindo a emissão de ASE nos intervalos entre os pulsos do OTDR. Ainda assim, o ganho adicional pode ser insuficiente devido à baixa potência de saturação do SOA. Neste trabalho, será desenvolvido experimentalmente um método para superar a limitação de saturação de um SOA e permitir maiores ganhos de amplificação para pulsos de OTDR. O conceito básico consiste em se aproveitar do fato de que o ciclo de uso de um OTDR é relativamente baixo, o que permite subdividir os pulsos em sub-pulsos, amplificá-los um a um e depois recombiná-los, de forma transparente ao OTDR. Com base na idéia proposta acima, nesta dissertação de mestrado terão avaliados métodos usando a polarização e o comprimento de onda dos pulsos.

## Palavras-chave

Amplificação óptica; SOA; OTDR; fibra óptica; ganho.

## Abstract

Capote Mastrapa, Greter; von der Weid, Jean Pierre (Advisor). **Control of the saturation power of semiconductor optical amplifiers in pulsed regime** . Rio de Janeiro, 2015. 50p. MSc. Dissertation — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The growing demand of using optical communication systems, either by increasing the number of users or the amount of information sent, requires a substantial increase in the need to develop new systems and components. The optical time domain reflectometry (OTDR) is the most common technique for detecting faults in fiber optic links. In some types of optical network, such as passive optical networks (PONs), losses in the links are very high due to the presence of splitters that divide the signal to each user (in FTTH scenario) or each user group (FTTB / FTTA), which considerably reduces the maximum distance reached by the OTDR. In terms of components used for optical communication, those used for optical amplification is of great importance. Among them are present optical semiconductor amplifiers. One way to overcome the limitations imposed by high losses is the use of a semiconductor optical amplifier (SOA), which at the same time amplifies the signal and acts as a key, inhibiting the emission ASE in the intervals between the OTDR pulses. Still, the additional gain may be insufficient due to low saturation power SOA. This work will develop experimentally a method to overcome the limitation of saturation of an SOA and allow higher amplification gains for OTDR pulse. The basic concept is to take advantage of the fact that the use of an OTDR cycle is relatively low, which allows to split the pulses into sub-pulses, amplify them one by one and then recombine them in a transparent manner to the OTDR. Based on the idea proposed above, this master thesis will be evaluated using methods polarization and wavelength of the pulses.

## Keywords

Amplification optic; SOA; OTDR; optic fiber; gain.

## Sumário

1	Introdução	13
1.1	Estrutura da dissertação	14
2	Aspectos Teóricos	15
2.1	OTDR	15
2.2	Amplificadores ópticos semicondutores	22
2.3	Polarization Beam Splitter (PBS)	28
2.4	Redes de Bragg	29
3	Montagem Experimental por Polarização	31
4	Montagem Experimental por Comprimento de Onda	38
5	Conclusões	49
	Referências Bibliográficas	50

## Lista de figuras

2.1	Curva OTDR caracterizada por eventos ópticos.	16
2.2	Definição do Alcance Dinâmico.	19
2.3	Ilustração para Evento e Atenuação de Zona Morta do OTDR.	21
2.4	Estrutura de região ativa angulada para a elaboração de amplificadores de ondas propagantes.	23
2.5	Estrutura de material transparente para a construção de amplificadores de ondas propagantes.	24
2.6	Transições radiativas principais entre bandas em um semicondutor.	24
2.7	Exemplo de curva de saturação de ganho, para $G_0 = 30$ dB.	27
2.8	Representação física do PBS.	28
2.9	Esquema da modulação local do índice de refração do núcleo da fibra óptica que constitui a rede de Bragg	29
2.10	Princípio de funcionamento de uma rede Bragg em fibra óptica. Uma faixa estreita do espectro de luz, centrada no comprimento de onda de bragg ( $\lambda_B$ ) é refletida e transmitido o espectro restante	30
3.1	Diagrama para a divisão dos pulsos usando polarização.	31
3.2	Espectro do sinal antes de passar pelo filtro.	33
3.3	Espectro de transmissão do filtro usado.	33
3.4	Espectro de transmissão depois do filtro.	34
3.5	Espectro de transmissão de 2 pulsos /1 pulso.	35
3.6	Esquema das chaves ópticas.	35
3.7	Curva de saturação medida no OSA	36
3.8	Curva de saturação medida no Power Meter.	37
4.1	Espectro de transmissão da rede 1553,33 nm(1).	39
4.2	Espectro de reflexão da rede 1553,33 nm (1).	39
4.3	Espectro de transmissão das redes 1, 2, 5, 6, 9,10 por ambos extremos.	40
4.4	Espectro de reflexão das redes 1, 2, 5, 6, 9,10 por ambos extremos.	40
4.5	Diagrama da divisão do pulso por comprimento de onda usando Redes Bragg.	41
4.6	Diagrama em blocos do esquema montado para a divisão do pulso por comprimento de onda.	42
4.7	Esquema da fonte.	42
4.8	Pulso óptico contendo o espectro das redes bragg 1,2,5,6,9,10 que sai da Fonte visto no OSA e no OSC.	43
4.9	Espectro de transmissão das redes 1, 2, 5, 6, 9,10 com a fibra de atraso entre elas. Pelo extremo da rede 1 e pelo extremo da rede 10.	43
4.10	Espectro de reflexão das redes 1, 2, 5, 6, 9,10 medido por ambos extremos com a fibra de atraso entre elas.	44
4.11	Espectro dos pulsos separados pelas redes bragg visto no OSA e no OSC.	44
4.12	Espectro dos pulsos separados pelas redes bragg visto no OSC.	45
4.13	Pulsos amplificados pelo SOA2.	45
4.14	Curva de saturação do SOA2.	46

4.15 Comparação entre a saída da Fonte e a saída total do sistema com divisão dos pulsos por comprimento de onda.

47

## Lista de tabelas

4.1	Valores utilizados nas redes.	38
4.2	$V_{in}$ & $V_{out}$ .	46

## **Lista de Abreviaturas**

**OTDR** Optical Time-Domain Reflectometry.

**FBG** Fiber Bragg.

**FTTB** Fiber To The Building.

**FTTH** Fiber To The Home.

**ITU** International Telecommunication Union.

**PON** Passive Optical Network.

**SOA** Semiconductor Optical Amplifier.

**VOA** Variable Optical Attenuator.

# 1 Introdução

Os tempos atuais se caracterizam pela rápida evolução dos meios de comunicação com um interesse do mundo no intercâmbio de informações, é por isso dois pontos de vital importância nossos dias, eles são como transmitir maior quantidade de informação necessitando-se de uma banda maior e como transmitir elas até distancias cada vez mais longas. As comunicações ópticas tem sido uma ferramenta muito importante e de muita investigação cientista em pos de utilizar elas para conseguir esses dois grandes objetivos pelo fato de poder transmitir altas taxas de dados pela fibra óptica. O surgimento dos amplificadores ópticos foi um passo muito importante pois este dispositivo possibilitou o uso da multiplexação por comprimento de onda (Wavelength Domain Multiplexer-WDM) o que ampliou em grande medida a capacidade de transmissão dos sistemas. Entre os diversos tipos de amplificadores, encontra-se os amplificadores semicondutores (Optical Semiconductor Amplifier-SOA). Os SOA's são particularmente atraentes por seu alto ganho ao longo de um amplo espectro, baixa figura de ruído (NF), poucas perdas dependentes de polarização (PDL) e resposta rápida no tempo. Além disso, eles são geralmente pequenos e precisam de baixo consumo de energia em comparação com amplificadores de fibra.

Do ponto de vista deste trabalho, as duas principais propriedades do SOA é o ganho que ele pode dar ao sinal e a potência óptica de saturação, ou seja, a potência em que o ganho reduz para metade do máximo possível. O ganho é obtido pela inversão de população obtida com a injeção de portadores no meio por meio de uma corrente elétrica. Portanto, aumentando-se a corrente, pode-se aumentar o ganho. Um pulso de luz com potência alta, no entanto, consome os portadores excitados e reduz a inversão de portadores reduzindo o ganho do amplificador causando a saturação. Antes de o ganho saturar, temos uma condição de linearidade onde o ganho não depende da potência óptica de entrada. Já após a saturação do ganho, o ganho passa a ser dependente da potência óptica de entrada, sendo reduzido rapidamente com o aumento desta. Não entanto os SOA's são geralmente limitados na potência de saída, aproximadamente de 13 dBm. Esta limitação de potência também coloca um limite de operação na faixa dinâmica. Tradicionalmente, o ganho do amplificador óptico pode ser aumentado a chamada taxa de bombeamento, o que corresponde a taxa de números de átomos que são excitados do menor para o maior nível de energia da transição atômica correspondente. No caso dos EDFA, o processo do bombamento é conseguido por excitação óptica, enquanto

que em dispositivos semicondutores tales como os SOA's, o mecanismo envolve uma corrente electrica. Por conseguinte, afim de aumentar o ganho do SOA, geralmente se aumenta a corrente de condução. No entanto, o excesso de corrente de condução pode levar a um aumento do numero de defeitos materiais no dispositivo, tanto intrínsecas como derivados do processo de fabricação. É um fato bem conhecido que a degradação gradual a longo prazo ou o desgaste dos dispositivos opto eletrônicos depende da densidade de corrente e a temperatura em que esteja operando. Além disso o sobre carregamento de corrente também pode aumentar a probabilidade de catástrofe causando dano parcial o total. A dissertação consiste em aumentar a potência de saída do sistema usando o amplificador óptico de semiconductor operando no regime pulsado.

## 1.1

### Estrutura da dissertação

Esta dissertação foi organizada em cinco capítulos, sendo o primeiro esta breve introdução.

No capitulo 2 apresentaremos os aspectos teóricos de alguns dos dispositivos usados em nossos montagens experimentais.

No capitulo 3 tratará da amplificação mediante o método da divisão do pulso por polarização.

No capitulo 4 seguindo com esta idea, é testado outra alternativa de amplificação por outro método, neste caso utilizando divisão por comprimento de onda usando as redes bragg.

Nos capítulos 3 e 4 se faz também um analise e interpretação dos gráficos e dos resultados obtidos e sua correspondência com os resultados teóricos desejados para finalmente apresentar algumas conclusões no capitulo 5 desta dissertação.

## 2 Aspectos Teóricos

### 2.1 OTDR

OTDR é uma técnica de monitoramento por reflectometria no domínio do tempo implantada em um instrumento optoeletrônico utilizado para caracterizar as ligações ópticas. Pode ser utilizado para estimar atenuação, o comprimento da fibra, incluindo uniões e perdas nos conectores, assim como a localização e identificação de falhas.

#### 2.1.1 Princípio de funcionamento

A reflectometria baseia-se na análise de sinais provenientes de uma reflexão em um determinado meio, para que seja possível extrair informações sobre este meio. O reflectômetro óptico, ou OTDR, consiste na técnica de reflectometria óptica no domínio do tempo capaz de caracterizar as ligações ópticas, podendo ser utilizado para calcular parâmetros tais como atenuação, comprimento, conexões e perdas nos conectores, assim como a identificação e localização de eventos (falhas) no enlace óptico [2], [3].

O pulso de luz é acoplado numa fibra em teste via um acoplador direcional óptico. As reflexões geradas pelo retro espalhamento e pela reflexão de Fresnel retornam ao acoplador direcional e são encaminhadas para o fotodiodo. O sinal elétrico é amplificado e enviado para um microprocessador que calcula o atraso de propagação e a atenuação percebida pelo fotodiodo de avalanche APD (An avalanche photodiode). A tela do OTDR apresenta os resultados num formato gráfico que permite a caracterização do estado da fibra [3].

Os parâmetros reconhecidos pelo OTDR são: o tempo em que o pulso é enviado na fibra, sua largura de pulso e a velocidade com que ele viaja através da fibra óptica. O tempo que o pulso de luz demora para viajar pela fibra, se refletir e voltar para o detector do OTDR pode ser medido precisamente. Sabendo-se este tempo, o OTDR pode determinar a distância (km). Na Figura 1, pode-se olhar como o OTDR mostra os eventos que comumente ocorrem em um enlace. Sabendo-se esse tempo, o OTDR pode calcular a distância a partir da seguinte fórmula [4]:

$$d = \frac{V_g t}{2} = \frac{C \cdot t}{2n_g}. \quad (2-1)$$

Onde  $V_g$  é a velocidade de grupo que a luz se espalha na fibra,  $t$  é o intervalo entre o sinal transmitido e o recebido,  $C$  é a velocidade da luz no vácuo,  $n_g$  é o índice de refração de grupo na fibra.

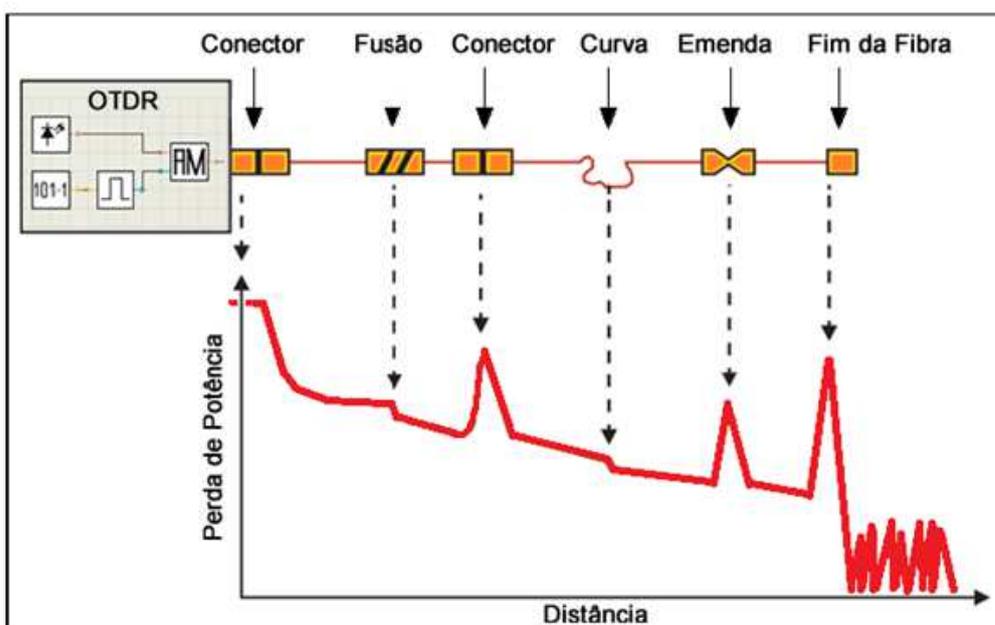


Figura 2.1: Curva OTDR caracterizada por eventos ópticos.

A curva obtida na Figura 2.1 adaptada de [4] mostra o nível de luz retro espalhada e picos de reflexão devido às reflexões de Fresnel, o que podem ser caracterizadas como eventos ópticos ao longo do enlace, podem ser decorrentes de fusões, curvas e etc., e o pico pode decorrer comumente de fissuras ou imperfeições na fibra. A forma de determinar os eventos que ocorrem no enlace óptico por meio do OTDR baseia-se principalmente na reflexão de Fresnel e no retro espalhamento de Rayleigh. A Reflexão de Fresnel acontece no início e no fim do enlace e se dá devido ao ângulo entre a fibra e o raio de luz incidente. [3].

O OTDR aponta uma falha em enlaces ópticos em função da potência refletida no local que ocorre o evento, pois existem coeficientes diferentes entre a fibra e o meio. Desta maneira, para determinar a potência refletida captada pelo OTDR, usa-se a fórmula 2-2 que para uma potência de luz incidente, a potência refletida  $P_{refl}$ , segundo [2], é dada por:

$$P_{refl} = P_0 \left( \frac{n_{fibra} - n_{ar}}{n_{fibra} + n_{ar}} \right)^2 \quad (2-2)$$

O retro espalhamento de Rayleigh decorre de irregularidades submicroscópicas na composição e na densidade do material da fibra. Em vista disso, ocorrem flutuações no valor do índice de refração do material ao longo da fibra, em função deste fenômeno os feixes de luz que viajam na fibra são espalhados resultando em perdas. Através do aperfeiçoamento dos processos de fabricação, as irregularidades na fibra vêm sendo controladas, contudo as originadas por diferenças na densidade do material são intrínsecas ao vidro e não podem ser evitadas [3].

Fisicamente, o Espalhamento de Rayleigh se dá quando o comprimento de luz, da luz incidente, é muito maior que as dimensões do átomo [5]. Considerando a probabilidade de ocorrência de Rayleigh (RS), então para um menor comprimento de onda, a chance do espalhamento de Rayleigh ocorrer é maior, daí uma justificativa do uso desse efeito para monitorar redes ópticas de acesso. A fórmula 2-3 especifica a ocorrência do retro espalhamento de Rayleigh, um dos principais fenômenos que caracteriza o OTDR e pode ser dado por:

$$P(RS) \sim \frac{1}{\lambda^4} \quad (2-3)$$

## 2.1.2

### Eventos

#### Conexão Inicial de uma fibra

Freqüentemente, nas extremidades de um enlace, observa-se um efeito chamado Reflexão de Fresnel. Este evento ocorre especificamente na interface da fibra óptica com outro meio, em locais como conectores, emendas mecânicas e também em locais onde a densidade do material varia. Este efeito é resultado da reflexão parcial do sinal incidente nessas interfaces[3].

#### Fim da fibra ou quebra

Pode-se observar um pico no final da fibra acompanhado de uma queda massiva no nível do sinal, representando o final do enlace. Uma quebra pode ser representada de igual maneira, do mesmo modo é comum um enlace aberto ou uma quebra gerar um decaimento imediato no nível do sinal.

#### Conector ou emenda mecânica

São descritos por um pico e uma queda desnivelada do sinal anterior ao pico. Este evento acontece devido a soma da reflexão do sinal que transpõe o conector, com o sinal propagante. A soma construtiva da potência é a causa da elevação do nível de potência no traço.

#### Emenda de fusão

Neste caso não tem pico no traçado, mas somente o desnível da tendência do sinal. Além disso existe a possibilidade de que um conector possa ocasionar uma reflexão que poderia aumentar o nível de energia ao invés de atenuar, isto ocorre devido à diferença no coeficiente de retro espalhamento antes e depois do conector.

#### Curvas no enlace

Este fato possui comportamento muito semelhante à emenda de fusão. Sua diferenciação esta relacionada com a planta de instalação da fibra, ou seja, verifica-se onde tem e não tem conectores, para que por exclusão conclua-se uma dobra.

## Rachaduras ou fendas

Aqui descreve-se uma fibra danificada. Seu sinal característico é composto por um pico bem acentuado seguido de queda com sinal irregular. Um evento deste tipo pode acontecer em qualquer parte do enlace de acordo com as características da fibra utilizada. Uma jeito de olhar esse tipo de evento baseia-se em aumentar a faixa dinâmica de um sinal OTDR, desta forma é possível identificar de forma mais exata os eventos que ocorrem na fibra [6].

### 2.1.3

#### Faixa Dinâmica

Uma das características mais importantes de um OTDR é o alcance dinâmico, já que determina o comprimento máximo observable de uma fibra, considerando-se a atenuação na fibra, nas emendas e nas conexões. Além disso se deve considerar que quanto maior o comprimento da fibra, mais o sinal retro espalhado se aproximam do ruído, aumentando a margem de erro das medidas e fazendo com que pequenos eventos sejam dificilmente detectados. Para calcular uma perda de emenda com valor de precisão de 0,1 dB, precisa-se de uma relação sinal ruído de aproximadamente 6,5 dB acima do nível de pico do ruído. Para uma de precisão de 0,05 dB, precisa-se de uma relação sinal ruído de aproximadamente 8dB acima do nível de pico de ruído, que por sua vez está a aproximadamente 2,3 dB acima do nível médio de ruído (SNR=1) [3].

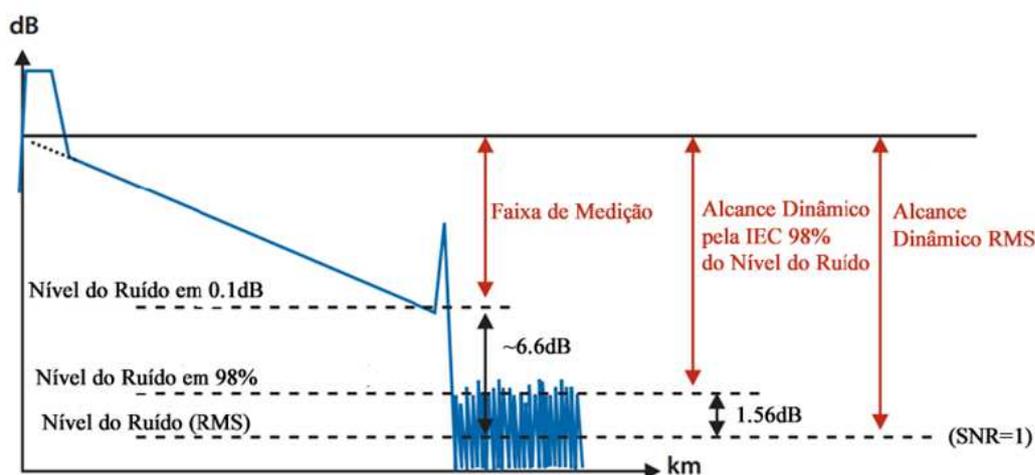


Figura 2.2: Definição do Alcance Dinâmico.

Os OTDRs enviam pulsos repetidamente até a fibra. São obtidos médias dos resultados para que o ruído aleatório do receptor seja suavizado no tempo.

Na tela do OTDR, o nível de ruído vai diminuindo com o tempo. Se o tempo é maior, maior será o alcance dinâmico. As grandes melhorias do sinal acontecem nos minutos iniciais. Comumente nos OTDRs após três minutos de medição é que são especificadas suas faixas dinâmicas [3].

Pode-se especificar uma técnica para achar o alcance dinâmico quando o nível de ruído supera em 98% aos pontos de dados. Esta definição é contemplada pela norma IEC 61746 do IEC (International Electrotechnical Commission). Por meio do RMS (root mean square) , este fenômeno pode ser também caracterizado, atribuído pelo nível de ruído quando o SNR é igual 1, sendo a diferença entre o ponto do traçado de retro espalhamento extrapolado na extremidade próxima da fibra e o RMS nível de ruído. Se tiver ruído Gaussiano, o valor RMS pode ser comparada com a definição da IEC 61746 subtraindo 1,56dB de RMS do alcance dinâmico. Além disso, o alcance dinâmico com uma ideia do limite que o OTDR pode medir quando o nível de ruído é de 0,1 dB no traçado. A diferença entre o  $N = 0,1$  e o  $SNR = 1$  (RMS) de definição é de aproximadamente menor que 6,6dB, significando que um OTDR com uma alcance dinâmico de 28dB ( $SNR=1$ ), pode medir um evento na fibra de 0,1 dB, com um alcance dinâmico de 21,4dB [7].

#### 2.1.4

##### Zona Morta

Em um OTDR, a distância (ou tempo) entre o início de um evento e o ponto onde um evento consecutivo pode ser detectado no link de fibra é chamada como zona morta. Esta zona é também chamada como resolução espacial entre dois pontos, já que determina o espaçamento mínimo que pode ser medido entre dois eventos. Existem os chamados trechos "cegos" na curva do OTDR, que ocorrem devido a eventos reflexivos, que saturam o receptor do OTDR. Durante estes trechos, não pode-se detectar com precisão o sinal de retro espalhamento no OTDR. [3][7]. A Zona morta é especificada tanto para um caso não reflexivo, e uma atenuação. No caso não reflexivo o evento óptico sofre uma queda ou elevação na potência durante o traçado do OTDR. Na atenuação, este evento óptico é caracterizado através de salto atenuado seguido de uma normalização.

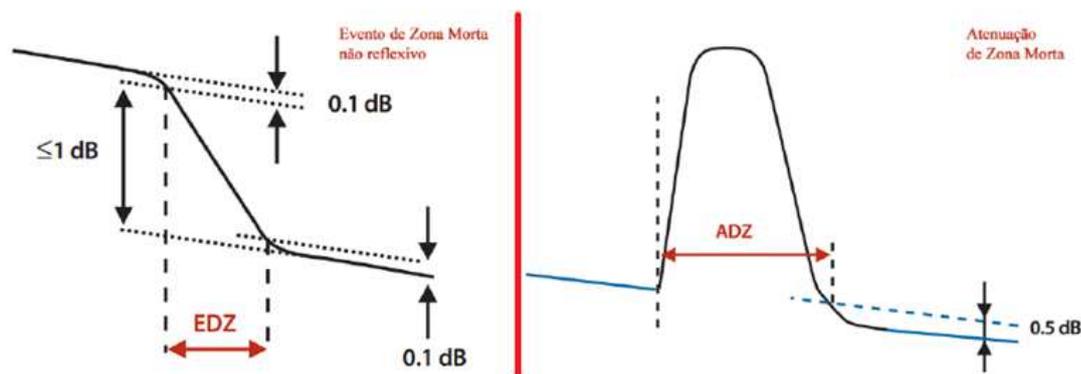


Figura 2.3: Ilustração para Evento e Atenuação de Zona Morta do OTDR.

### Evento de zona morta (event dead zone - EDZ)

É a distância mínima entre um ponto onde ocorre um evento, até outro ponto onde outro evento de mesma natureza pode ser detectado, estes dois eventos podem ser ainda distintos. Esse evento só pode ser detectado sem poder se medir a perda associada a ele. Na Zona Morta estes eventos se classificam em reflexivos (quando existir reflexões de Fresnel) e não reflexivos (quando existem degraus por variação do nível do sinal retro espalhado), no lado esquerdo da Figura 2.3 observa-se o evento de zona morta não reflexivo. Para eventos reflexivos, a zona morta de evento é definida como a distância medida no ponto onde a curva cai 1,5dB do nível de saturação devido à reflexão de Fresnel. Para eventos não reflexivos, o evento de zona morta se refere à distância entre os pontos onde os níveis de início e fim de uma emenda estão dentro de  $\pm 0,1\text{dB}$  ou com um determinado valor ( $\leq 1\text{dB}$ ) de seus valores iniciais e finais. Tipicamente, esta zona morta é um valor fixo e somente depende da largura de pulso aplicada.

### Atenuação de zona morta (attenuation dead zone - ADZ)

É a distância mínima entre o ponto de início de uma reflexão e o ponto onde o traço do retro espalhamento volta a ser detectado, podendo ser feitas as medidas para a verificação da localização de eventos discretos (não reflexivos). A atenuação de zona morta para um evento reflexivo é definida na norma IEC 61746 [4], o lado direito da Figura 2.3 apresenta este caso. Esta distância é medida no ponto onde a curva tenha retornado acima do nível da curva retro espalhada, extrapolada para a esquerda, considerando uma reflectância de  $-30\text{dB}$ . Geralmente, se a potência refletida é maior, maior será a zona morta[3].

## 2.2

### Amplificadores ópticos semicondutores

Esudo-se este dispositivo semicondutor, analisando seus conceitos básicos e como acontece seu processo de ganho e saturação.

#### 2.2.1

##### Conceitos básicos

O amplificador óptico semicondutor (SOA), é um dispositivo optoeletrônico que amplifica a luz que o atravessa, sob determinadas condições. Este dispositivo é construído, na sua forma mais básica, por uma junção  $p-n$  feita de materiais semicondutores de maneira similar à diodos lasers [8]. Historicamente, os SOAs surgiram dos lasers semicondutores, os quais funcionam como amplificadores antes de alcançar ao limiar de operação, em vista disso, os primeiros amplificadores foram propriamente lasers polarizados abaixo do limiar [9].

A luz que se espalha ao longo do SOA é amplificada por meio de um processo chamado de emissão estimulada [8][10]. Este fenômeno acontece numa região de ganho, chamada ativa. No começo, a região de depleção formada na junção de material  $p-n$  opera como a região ativa [10]. Os SOAs podem ser classificados em dois tipos principais:

**Travelling-Wave (TWA) :** A luz se espalha uma única vez no meio de ganho. Também é chamado de amplificador de ondas propagantes.

**Fabry-Perot (FPA):** Quando o dispositivo tem faces que refletem parcialmente a luz hacia o interior do dispositivo, semelhante que um diodo laser, são polarizados abaixo do limiar.

Os amplificadores de Fabry-Perot apresentam um ganho extremamente sensível para variações na temperatura e o comprimento de onda de entrada [10], além disso sua largura de banda de amplificação é relativamente pequena ( $\Delta\nu \sim 100\text{GHz}$ , [8]) para sua utilização em comunicações ópticas [8]. Uma largura de banda maior é preferencial para a amplificação de sinais de banda larga, já que ganho pode ser considerado plano no espectro do sinal [10]. Conseqüentemente, este tipo de amplificador foi excluído pelos do tipo de ondas propagantes para este fim [8], ainda que estes SOAs sejam dispositivos de fácil fabricação, visto que são construídos identicamente como diodos lasers.

A fim de que o dispositivo funcione como um amplificador de ondas propagantes, as faces da região ativa devem ter camadas anti-reflexivas para eliminar a cavidade [8][9] podendo, também, ter suas faces cortadas no ângulo de máxima transmissão (Brewster), diminuindo-se ainda mais as reflexões na interface [8][9][10]. Outras soluções podem incluir: desassociar mecanicamente as ondas de entrada e saída, angulando a região ativa [8] ou adicionar uma camada de material, chamado transparente, entre a camada ativa e os filmes anti-reflexivos [8]. Neste caso, o feixe de luz se abre espacialmente nesta região, já que não é encaminhado, e, o que é refletido segue a ser espalhado, fazendo com que a luz que volta à camada ativa seja cada vez menor. Estas abordagens para a elaboração de SOAs deste tipo podem ser vistas nas Figuras 2.4 e 2.5, respectivamente.

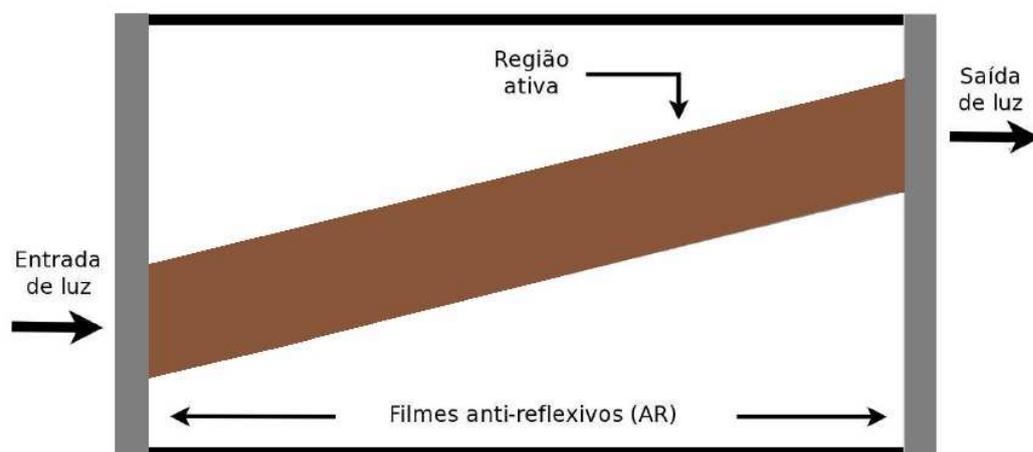


Figura 2.4: Estrutura de região ativa angulada para a elaboração de amplificadores de ondas propagantes.

Um amplificador óptico semiconductor consegue ganho através de transições entre bandas de energia, que são as regiões de valores de energia permissíveis para os portadores [11]. Em um semiconductor, podem ocorrer três principais processos de transição entre bandas, se é assumido um sistema simplificado de dois níveis [12]: absorção, emissão estimulada e emissão espontânea.

Estas transições são ilustradas, simplificada, na Figura 2.6. Elas podem ocorrer entre as bandas de condução e de valência. A diferença entre as energias destas duas bandas é chamada de energia de bandgap.

A banda inferior é a de valência e a superior é a de condução. Os círculos vazios representam lacunas, enquanto os preenchidos representam elétrons,  $h\nu$  é a energia do fóton, onde  $h$  é a constante de Planck e  $\nu$  é a frequência óptica.

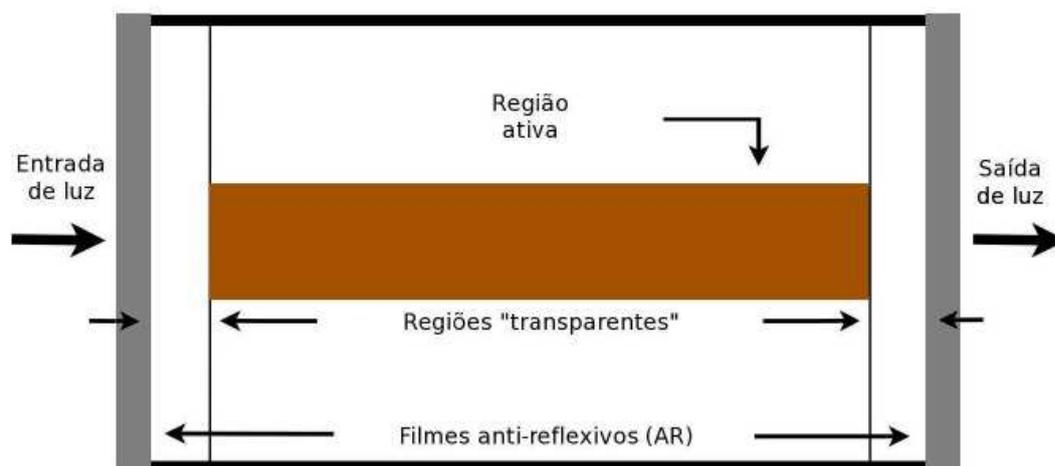


Figura 2.5: Estrutura de material transparente para a construção de amplificadores de ondas propagantes.

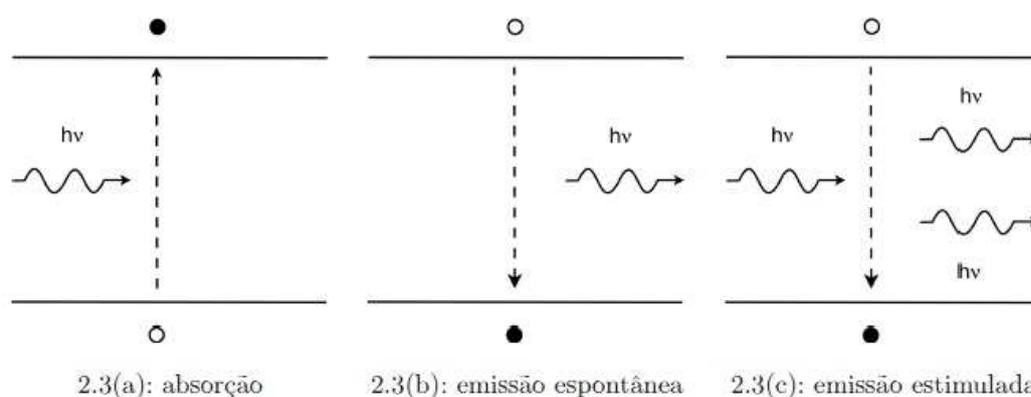


Figura 2.6: Transições radiativas principais entre bandas em um semicondutor.

**Absorção :** Um fóton incidente na região ativa poderá ser absorvido por um elétron da banda de valência, e este passará para a banda de condução. Isto acontece somente se o fóton incidente possuir energia superior à energia do bandgap.

**Emissão Espontânea:** A banda de condução é um estado excitado, ou seja, um elétron nesta banda não está em equilíbrio [9]. Existe então, uma probabilidade não nula de que um elétron deste nível se volte a combinar com uma lacuna da banda de valência, dando origem a um fóton de fase e direção aleatórias. Este processo é a origem do ruído em amplificadores ópticos, e não pode ser evitado, sendo intrínseco ao dispositivo [13].

**Emissão Estimulada:** Quando um fóton incidente possui energia que fica entre os níveis de quase-Fermi das bandas de condução e de valência, e havendo elétrons disponíveis na banda de condução, pode acontecer que este fóton interaja com um elétron, ocasionando a recombinação radiativa deste com uma lacuna da banda de valência. Desta recombinação surge um novo

fóton que é uma exata réplica do incidente, tendo as mesmas características deste como: comprimento de onda, fase e polarização.

A emissão estimulada em SOAs inicia-se com um bombeio elétrico. O que é conseguido, por meio da corrente de polarização do SOA, já que, no equilíbrio térmico, existe poucos portadores na banda de condução de uma junção p-n. Ao se polarizar uma junção diretamente, ocorre uma difusão de portadores pela junção [14]. Esta difusão posiciona os elétrons e lacunas frente a frente, por causa da diminuição da barreira de potencial. Quando a injeção de corrente é muito pequena ou nula, o SOA funciona como um detector [15], já que, absorve todos os fótons incidentes e os converte em sinais elétricos. Os SOAs podem, inclusive, ser utilizados para fins de detecção e amplificação simultânea. À medida que a corrente injetada incrementa-se, o fenômeno de emissão estimulada aumenta, e, quando iguala-se à soma da absorção, emissão espontânea e perdas, obtém-se uma condição denominada de transparência [13]. Na transparência, o sinal passa pelo SOA sem ser amplificado nem atenuado, este comporta-se como um amplificador de ganho unitário. Quando a corrente injetada é tal que o efeito de emissão estimulada seja dominante aos de absorção, de emissão espontânea e de todas as perdas envolvidas [16], ocorre a chamada condição de inversão de população, que possibilita o ganho no dispositivo [13]. O nome **inversão de população** surge da maior ocupação de portadores na camada de condução quando comparado à ocupação da camada de valência.

### 2.2.2 Ganho

Ganho em amplificadores, pode ser definida como a razão entre uma grandeza de saída por uma de entrada. Em SOAs, o ganho interno é o resultado da diferença entre a emissão estimulada e os outros processos somados às perdas no interior do semiconductor. Isto é, quando a probabilidade de se ter emissão estimulada é maior que as probabilidades de absorção e de emissão espontânea somadas às perdas. O ganho material por unidade de comprimento,  $g_m$ , em uma primeira aproximação, é função linear da densidade de portadores na camada de condução [8][9]:

$$g(n) = a(n - n_0), \quad (2-4)$$

onde,  $a$  é a variação do ganho em relação a  $n$ , o ganho diferencial,  $n$  é a densidade de portadores na região ativa e  $n_0$  é a densidade de portadores na

transparência. Definindo  $g$  como o ganho interno, tem-se [8]:

$$g(n) = \Gamma \nu_g g_m(n) = \Gamma \nu_g a(n - n_0), \quad (2-5)$$

Na equação 2-5,  $\Gamma$  é o fator de confinamento do campo óptico na região ativa e  $\nu_g$  é a velocidade de grupo do campo incidente. O ganho interno é a taxa de emissão estimulada. O ganho líquido interno,  $g_L$ , é o ganho interno menos as perdas internas. Desta forma [13],

$$g_L(n) = g_n - \alpha_t \quad (2-6)$$

onde  $\alpha_t$  representa as perdas totais no dispositivo, que é a soma das perdas no semiconductor com as perdas devido à refletividade residual das faces do amplificador. O ganho do amplificador, ou seja, do dispositivo todo, é obtido através da integração da potência ao longo do amplificador, pela Lei de Beers [8]:

$$\frac{\delta P(n, z')}{\delta z'} = g_L(n) P(n, z'). \quad (2-7)$$

A potência  $P(n, z')$  inclui a potência de todos os sinais de entrada. A integração é igual a:

$$P(n, z') = P_{in} e^{g_L(n)z}. \quad (2-8)$$

$G$  é definido como a razão das potências de saída e entrada:

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}}. \quad (2-9)$$

e, como,  $P_{out}(n, L) = P(n, z)|_{z=L} = P_{in} e^{g_L(n)L}$ , onde  $L$  é o comprimento do amplificador,  $G$  é:

$$G(n, L) = \frac{P_{in} e^{g_L(n)L}}{P_{in}} = e^{g_L(n)L}. \quad (2-10)$$

## Saturação de ganho

No item 2.2.2, assumiu-se ganho linear. Esta análise é apenas correta para “pequenos sinais”, sinais mais fortes que esses saturarão o amplificador, fazendo com que a análise prévia deva ser adaptada. A saturação de ganho acontece quando o ganho do dispositivo torna-se não-linear, isto resulta da quantidade finita de portadores disponíveis para que exista ganho, ou seja, enquanto a medida da potência de sinal aumenta, a disponibilidade de portadores na região ativa diminui ao ponto de acarretar uma redução do ganho do amplificador [8][9][13].

Isto pode ser entendido pela dependência do ganho interno com a potência de entrada [8]. Quando a potência incidente no amplificador se aproxima da potência de saturação definida como a potência para a qual o ganho cai à metade o amplificador deixa de ser linear com a potência, ou seja, o ganho decai com um aumento de potência [8]. Para o ganho total,  $G$  [9]:

$$G = \frac{G_0}{1 + \frac{P_{in}}{P_{sat,in}}} \quad (2-11)$$

onde,  $G_0$  é o ganho não-saturado, chamado de ganho para “pequenos sinais”,  $P_{sat,in}$  é a potência de saturação de entrada.

Um fator limitante para a aplicação de SOAs em enlaces multicanais, é a saturação de ganho, já que pode distorcer consideravelmente o sinal [8][13], devido aos efeitos prejudiciais da intermodulação e modulação imposta por outros canais [17]. Estes efeitos só são possíveis porque os SOAs possuem tempos de resposta muito rápidos, da ordem do nanossegundo [10], o que faz

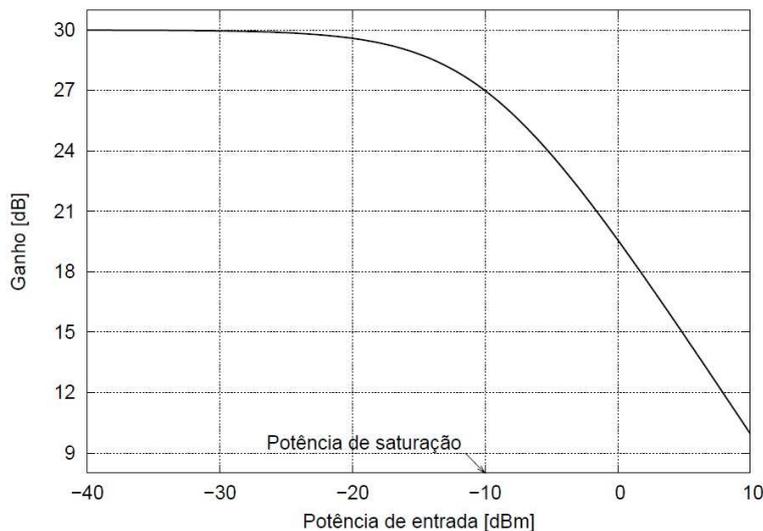


Figura 2.7: Exemplo de curva de saturação de ganho, para  $G_0 = 30$  dB.

com que as variações em amplitude presentes em um sinal sejam percebidos em outro. Esta característica de distorção de sinal fez com que os SOAs fossem preteridos em relação aos EDFAs para a amplificação de vários canais WDM [8][10]. E é este comportamento que permite a estes amplificadores operarem como conversores de comprimento de onda [8][13][10].

### 2.3 Polarization Beam Splitter (PBS)

Um divisor de feixe (beam splitter) é um dispositivo óptico que pode dividir um feixe de luz incidente (por exemplo, um feixe de laser) em dois ou mais feixes, que podem ou não podem ter a mesma potência óptica. Existem diferentes tipos de separadores de feixe e são utilizados para fins muito diversos. Por exemplo, divisores de feixe são necessários para interferômetros, auto correlatores, câmeras, projetores e sistemas de laser.

PBS(Polarization beam splitter)dividem aleatoriamente feixes polarizados em dois componentes linearmente polarizadas ortogonais. A luz polarizada S é refletida em um ângulo de 90 graus, enquanto a luz polarizada P é transmitida. PBS são normalmente em forma de cubos mas tem outras geometrias disponível . A figura seguinte ilustra o PBS.

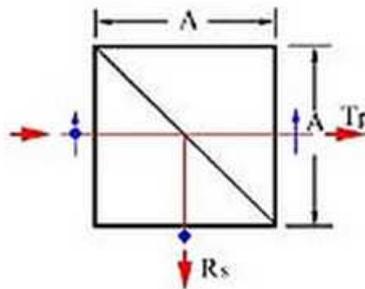


Figura 2.8: Representação física do PBS.

## 2.4

### Redes de Bragg

#### 2.4.1

#### Conceitos Básicos de Redes de Bragg em fibras ópticas

Uma rede de Bragg carregada em uma fibra óptica forma uma modulação periódica e local do índice de refração do núcleo da fibra (Figura 2.9). Comumente, dispõe de fibras com uma grande concentração de germânio.

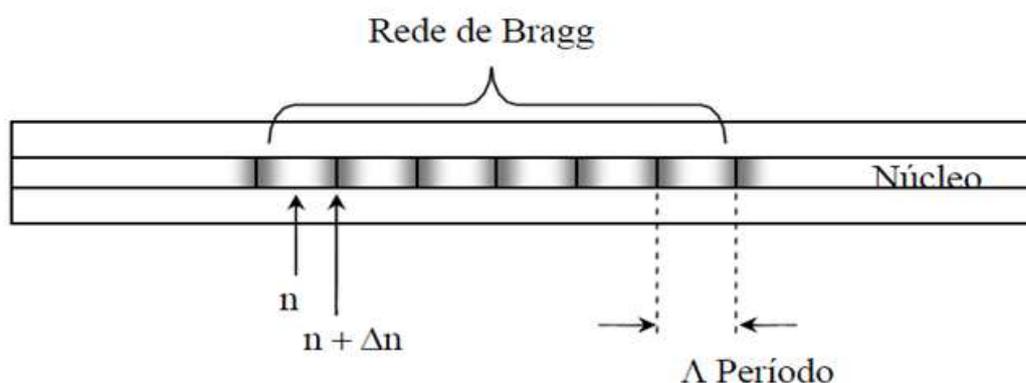


Figura 2.9: Esquema da modulação local do índice de refração do núcleo da fibra óptica que constitui a rede de Bragg

A rede de Bragg funciona como um filtro espectral reflexivo que escolhe um comprimento de onda de uma banda larga de comprimentos de onda que tenham sido acoplados à fibra (Figura 2.10). Este comprimento de onda, conhecido como comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ) está relacionado com a periodicidade espacial da modulação do índice de refração,  $\Lambda$ , e com o índice de refração efetivo do núcleo,  $n_{eff}$ , através da equação 2-12[18][19].

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2-12)$$

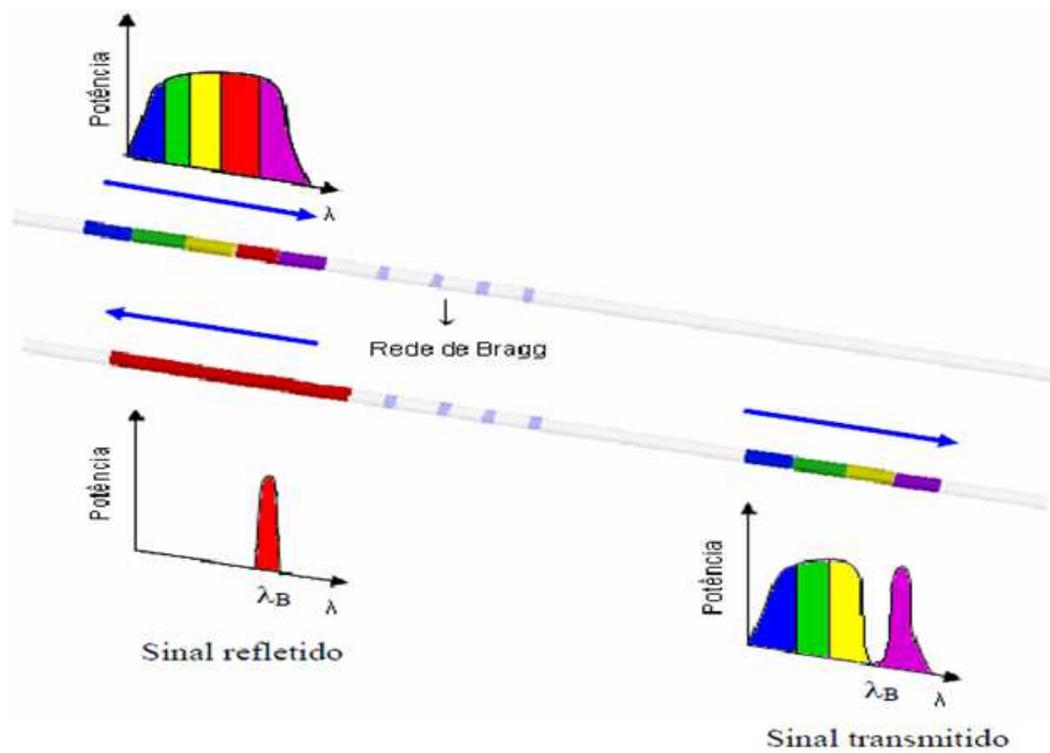


Figura 2.10: Princípio de funcionamento de uma rede Bragg em fibra óptica. Uma faixa estreita do espectro de luz, centrada no comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ) é refletida e transmitido o espectro restante

### 3 Montagem Experimental por Polarização

Para aumentar a potência do sinal óptico realizaram-se dois experimentos, no primeiro caso trabalhou-se com polarização e no segundo caso com comprimento de onda. Para realizar a montagem experimental das técnicas são utilizados vários equipamentos, entretanto todos foram aferidos e testados previamente garantindo um bom funcionamento dos sistemas. Os experimentos serão explicados com mais detalhes a seguir.

No primeiro experimento com a polarização, cada pulso do OTDR é dividido em dois pulsos de igual intensidade, mas com diferentes polarizações. Um com polarização vertical e outro com polarização horizontal. Estes pulsos são amplificados individualmente e logo são recombinados para obter o sinal amplificado desejado. A configuração na bancada está exemplificada (Figura 3.1) e descrita abaixo. Com este arranjo realizou-se os testes para comprovar se o ganho alcançado seria o dobro em relação ao ganho que se conseguiria com a amplificação de um pulso só.

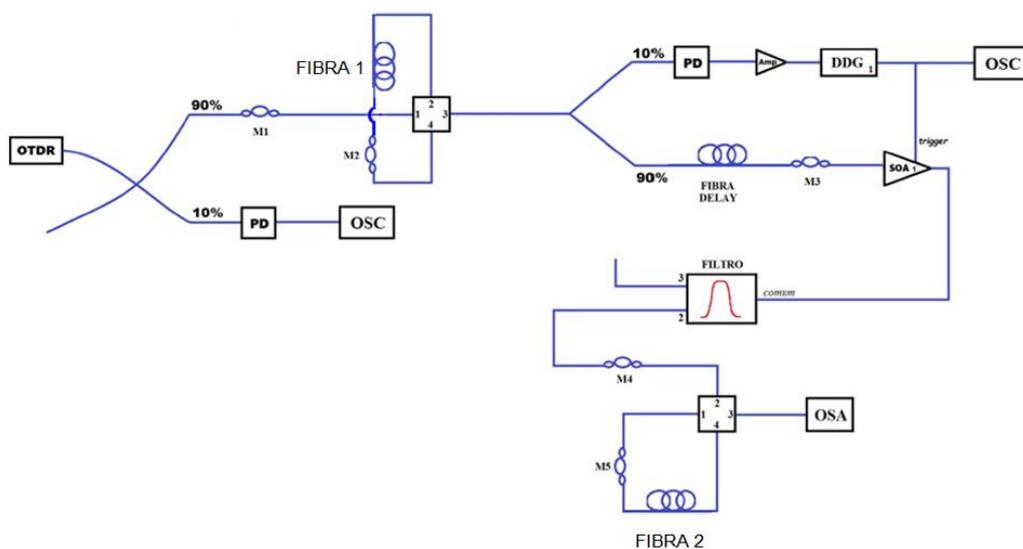


Figura 3.1: Diagrama para a divisão dos pulsos usando polarização.

Usamos um OTDR comercial como fonte de luz; logo, com um divisor 90/10 obtemos por uma parte o sinal de referência para monitoramento e pela outra colocou-se um controlador de polarização manual para garantir que as polarizações horizontal (H) e vertical (V) estejam alinhadas com as polarizações H e V do PBS. Ao se ajustar os controladores de polarização 1 e 2 consegue-se que os dois pulsos resultantes na saída do PBS estejam com

a mesma intensidade e polarizações diferentes, um com polarização vertical e o outro com polarização horizontal atrasado em relação ao primeiro. Se faz necessário ajustar correctamente as polarizações para não aparecem pulsos indesejados, isto é qualquer pulso além dos dois mencionados anteriormente.

No primeiro PBS, pela porta 1 entra o pulso que contem as duas polarizações. Entretanto, só uma delas(a horizontal) passa direito até a saída pela porta 3. A polarização (V) vai pela Fibra 1 e o controlador de polarização 2 que estão colocados entre as portas 2 e 4 do PBS. É importante mencionar também que o comprimento da Fibra 1 somado ao comprimento do controlador de polarização 2 tem que ser os mesmos que vão ser usados no segundo PBS que juntará os pulsos. A soma dos comprimentos da fibra mais o Mickey são de 59,66 m. O pulso com polarização vertical acaba por sofrer um retardo no seu percurso, o que o leva a ter um tempo maior até chegar a saída do PBS. Assim, os pulsos estavam separados no tempo e com polarizações diferentes. Tendo já os dois pulsos iguais separados um do outro na saída do circulador 1 coloca-se novamente um divisor 90/10. O 10% vai ser usado como sinal de sincronização para gatilhar o Gerador de Atraso Digital (DDG) que vai dar o retraço necessário para ligar ao SOA no momento desejado. Do outro lado, a parcela do 90% do sinal seguido de uma fibra de atraso e depois o controlador de polarização 3. A soma deles medem 42,06 m, o que equivale a um tempo de 206 ns,(este tem que ser sempre maior que a soma dos retardos no outro braço).

Retardo do braço de 10%:

(Retardo de PD + retardo do amplificador elétrico + retardo do DDG)+(retardo do driver do SOA) = (95 ns)+(70 ns)=165 ns.

Esse retardo de 165ns tem que ser compensado com o retardo do outro braço do splitter que foi de 206ns. Para tal, usa-se o DDG ou Stanford que manualmente pode ser ajustado para conseguir igualar os retardos introduzidos pelos equipamentos. Esse gerará o pulso que vai disparar o SOA duas vezes para amplificar individualmente os dois pulsos. No tempo restante, o SOA não amplifica nada. Na saída do SOA se obtém dois pulsos amplificados ao máximo (SOA trabalhando no regime saturado, passando por ele a máxima corrente de 2A).

Assim se tem o sinal de saída do SOA visto no OSA, onde a amplificação por emissão estimulada (ASE) era alta com respeito a potência do sinal. Por isso decidiu-se colocar um filtro com a seguinte caracterização:

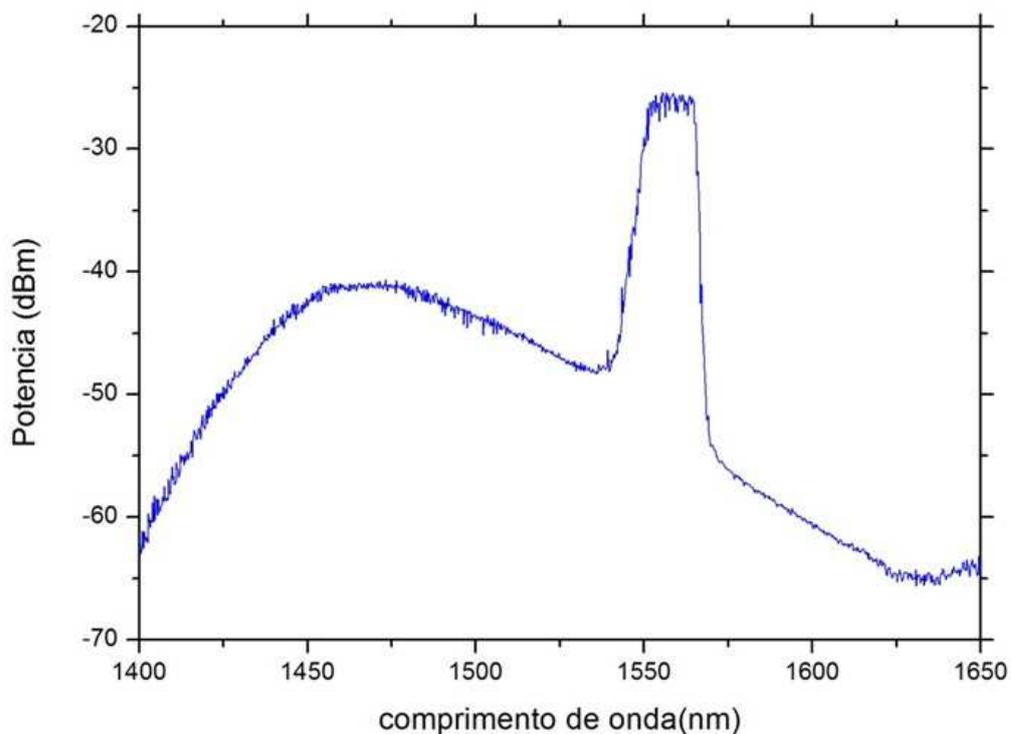


Figura 3.2: Espectro do sinal antes de passar pelo filtro.

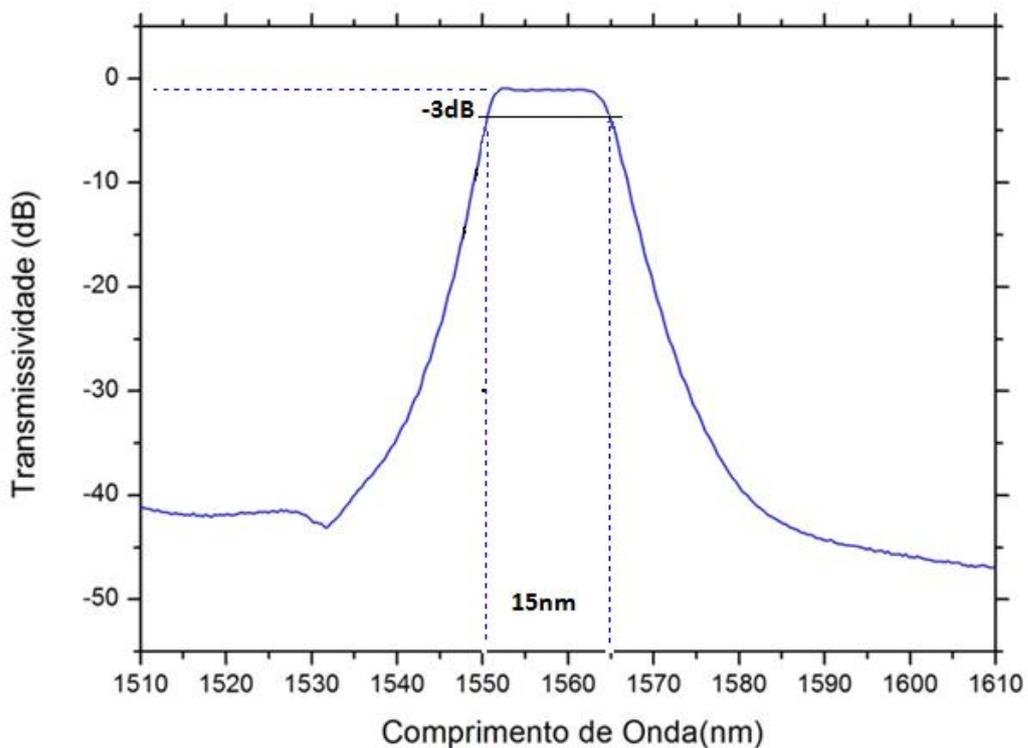


Figura 3.3: Espectro de transmissão do filtro usado.

Já depois de obter só a sinal e ter tirado a ASE (como observa-se na figura 3.3), coloca-se o controlador de polarização 4 que vai garantir novamente

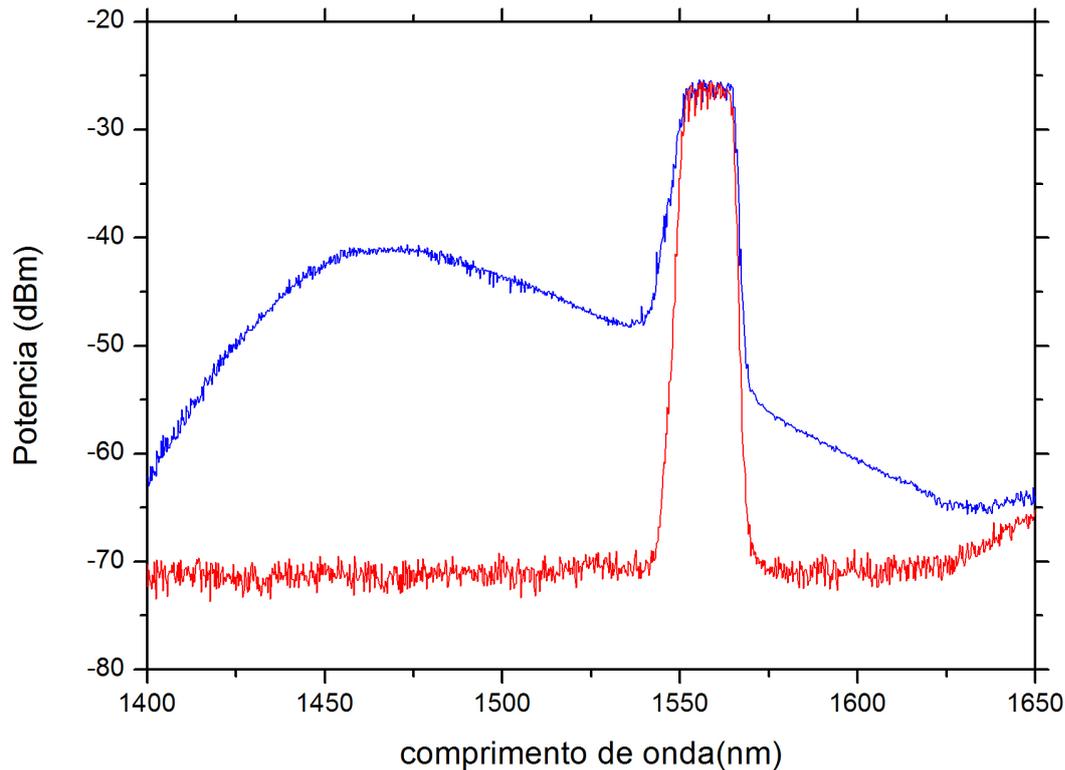


Figura 3.4: Espectro de transmissão depois do filtro.

ter um pulso com polarização H e o outro pulso com polarização V. Os pulsos no percurso pela fibra podem mudar sua polarização, esse controlador vai garantir que eles entrem no PBS corretamente alinhados como na primeira parte do sistema. Logo depois, o primeiro pulso vai entrar pela porta 2 do segundo PBS e vai percorrer o caminho mais longo através da fibra e pelo controlador de polarização 5. Estes foram colocados juntos para atrasar o pulso na mesma proporção que no início, com aproximadamente as mesmas medidas como observa-se a seguir:

$$\text{Fibra 1}(57,38\text{m}) + \text{Mickey 2}(2,28\text{m}) \quad 2,28=59,66 \text{ m}$$

$$\text{Fibra2} (56,88) + \text{Mickey 5}(2,15) \quad 2,149=59,37 \text{ m}$$

Assim, se garante que os caminhos são os mesmos e os pulsos também. O pulso que tinha saído atrasado, na primeira parte, agora vai passar direto juntando-se na saída com o outro que tardou mais. Desta forma, obtemos na saída um pulso só, de maior potência do que aquele que se conseguiria sem a divisão em dois pulsos no início. Usando a polarização se consegue ganhar os 3 dB que estávamos esperando. Dispõem-se os resultados a seguir:

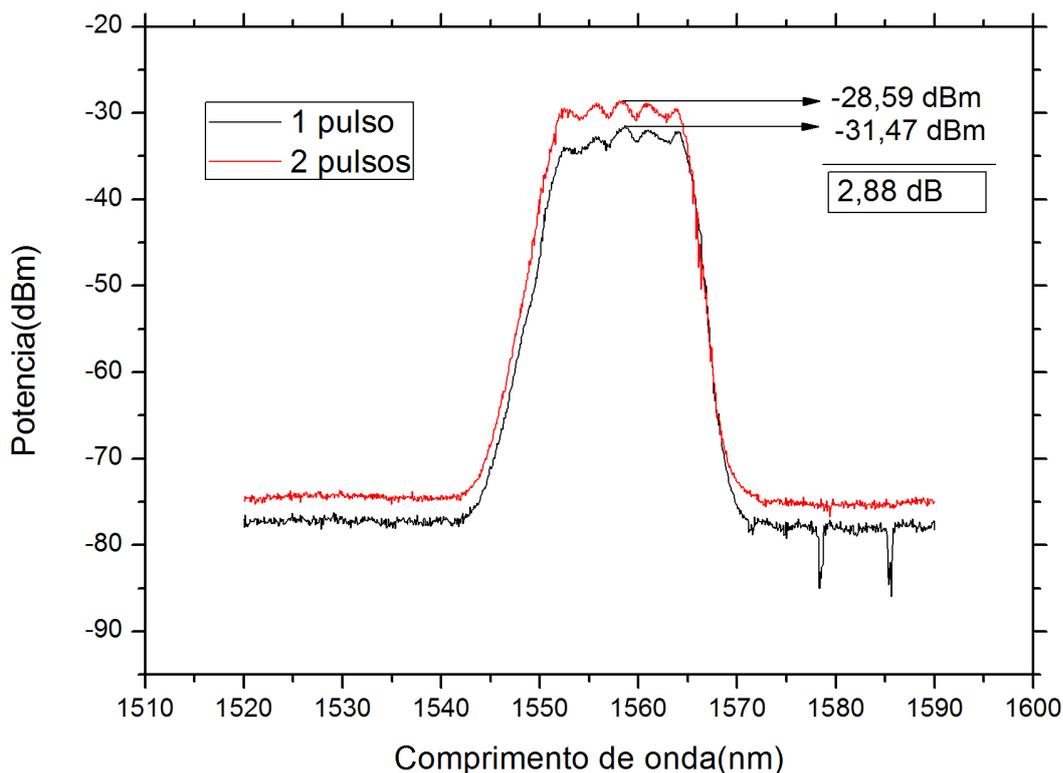


Figura 3.5: Espectro de transmissão de 2 pulsos /1 pulso.

Na figura 3.5 pode-se observar que o ganho de 2,88 dB é muito perto do resultado ideal. Pode-se afirmar que o método utilizado apresentou resultados satisfatórios.

Os resultados obtidos permitem obter algumas conclusões. Uma muito importante é garantir que o SOA esteja trabalhando em saturação, como parece estar pelos resultados de ganho obtidos. Mas para ter total certeza é necessário traçar a curva de saturação do SOA.

Assim, para traçar a curva de saturação do SOA foi necessário incluir duas chaves ópticas para obter a potência de entrada e saída de nosso sistema. A figura a seguir detalha o bloco de chaves ópticas que foi inserido no nosso diagrama.

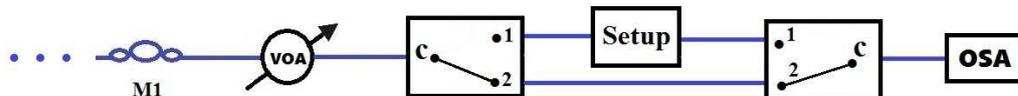


Figura 3.6: Esquema das chaves ópticas.

As chaves foram inseridas depois do controlador de polarização 3, que no diagrama inicial conecta-se ao SOA. Colocou-se primeiro um VOA para atenuar a potência de 0 a -20dB, seguido das chaves ópticas. O primeiro passo seria deixar um pulso só na saída do primeiro PBS, ajustando no controlador de polarização 2, favorecendo uma polarização só, seja ela (H) ou (V). Foi necessário colocar uma caixa de chaves ópticas para fazer duas medidas, a potência da sinal antes do setup e passando pelo setup. Na primeira o sinal passa direto sem passar pelo SOA, escolhendo a combinação das chaves (2,2). Na outra medida, passa pelo setup sendo amplificado e visto no final do sistema com a combinação das chaves em (1,1).

Com o conjunto de chaves ópticas foi possível realizar medições em duas configurações diferentes mudando somente as chaves de posição. O conjunto de chaves ópticas ajudou muito nas precisões das medidas e nos gráficos, pois sem elas teríamos que ter desconectado e conectado a fibra nos pontos desejados diversas vezes, assim alterando o estado de polarização.

Os gráficos traçados foram os seguintes:

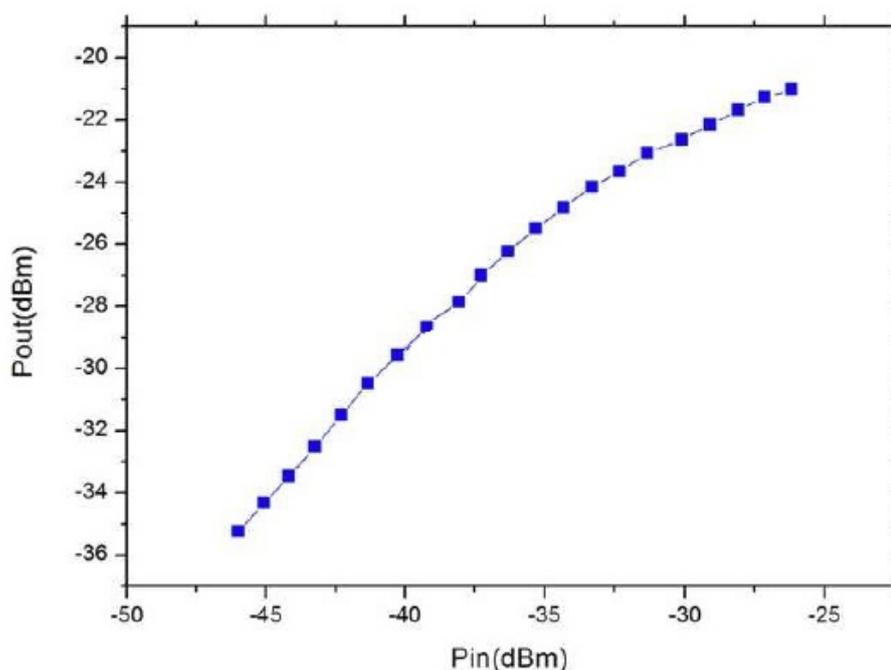


Figura 3.7: Curva de saturação medida no OSA

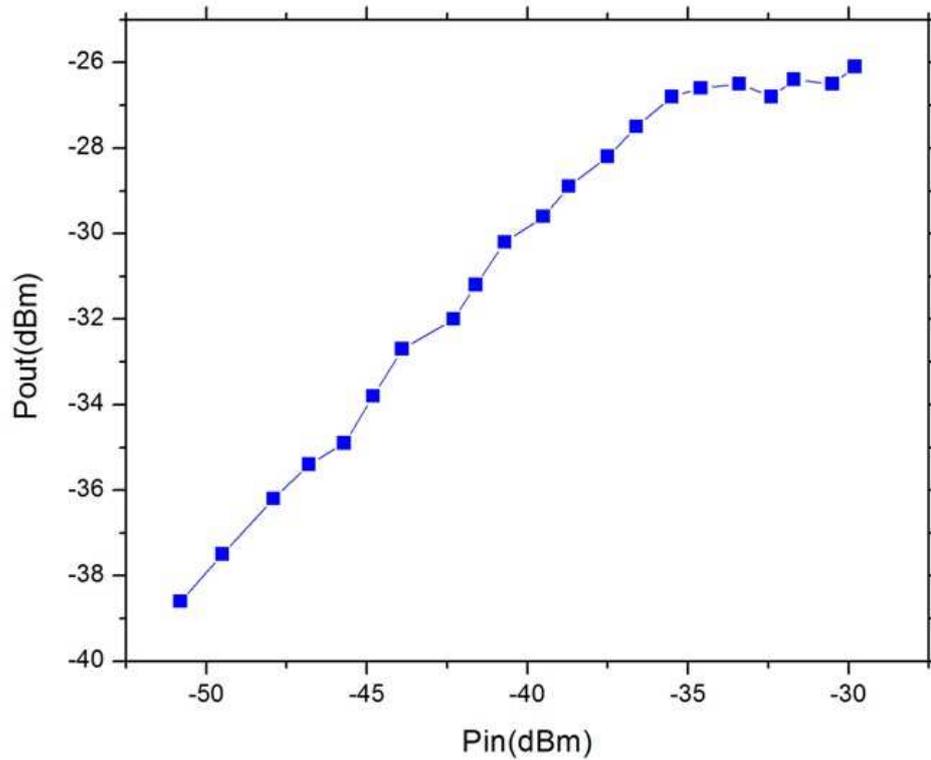


Figura 3.8: Curva de saturação medida no Power Meter.

Comparando os gráficos 3.7 e 3.8, o segundo gráfico foi muito mais coerente. Pode-se observar que nosso SOA está saturado em aproximadamente 6 dB. Saber o quanto nós estamos saturando o SOA é de muita utilidade para estimar o quanto mais se poderia ter de ganho se pudéssemos dividir em mais de dois pulsos a sinal de entrada do OTDR.

## 4

### Montagem Experimental por Comprimento de Onda

No capítulo 4 provou-se outro método para alcançar maior potência na amplificação óptica com o SOA, agora com a divisão por comprimento de onda usando Redes Bragg. Nossa fonte de pulsos continua sendo o mesmo OTDR comercial; por isso, a primeira problemática foi saber em que comprimentos de onda seriam as Redes Bragg do experimento, tendo em conta o espectro do OTDR e o espectro do filtro (usado no experimento anterior) para eliminar a ASE amplificada pelo SOA. Nessa faixa de comprimentos de onda onde ambos espectros coincidiam, foi tomada como referência para escolha das Redes Bragg uma distância de 0.8nm separadas entre elas.

As primeiras redes foram as de 100 GHz, que serão numeradas para poder citá-las no texto à frente:

Tabela 4.1: Valores utilizados nas redes.

Número	Valor
1	1553.33
2	1554.13
3	1554.94
4	1555.75
5	1556.55
6	1557.36
7	1558.17
8	1558.98
9	1559.79
10	1560.61

Depois disso, observaram-se os espectros de transmissão e reflexão das redes. A seguinte é da rede 1 (1553,33nm), entretanto é um espectro típico que se repete nas outras redes.

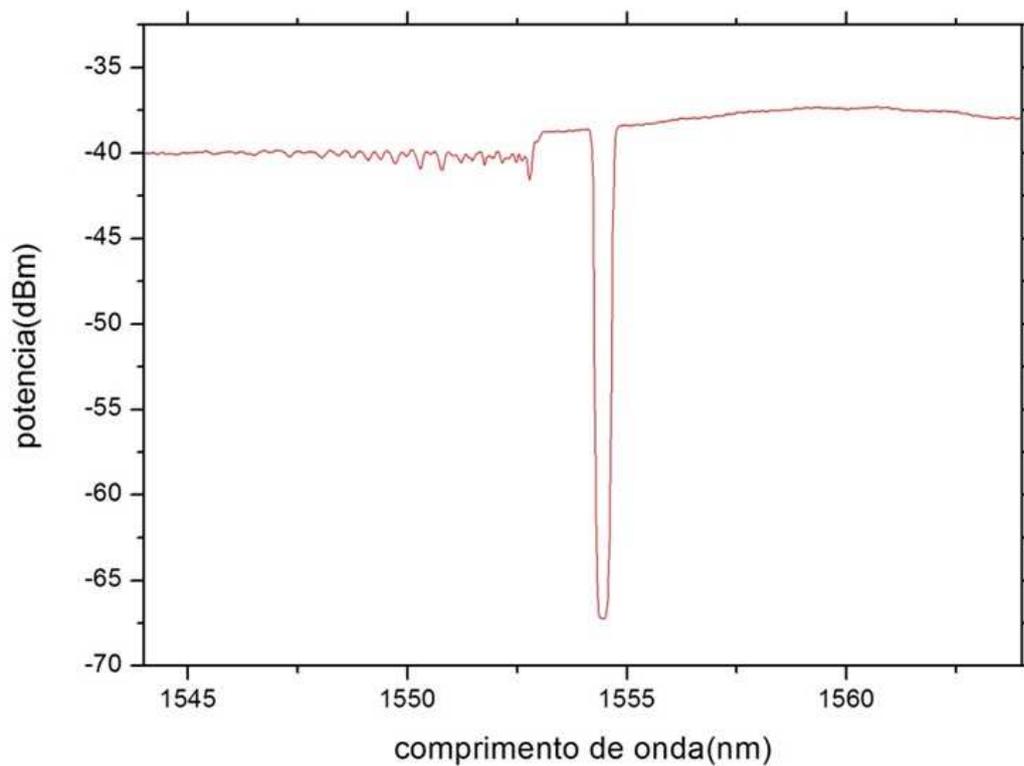


Figura 4.1: Espectro de transmissão da rede 1553,33 nm(1).

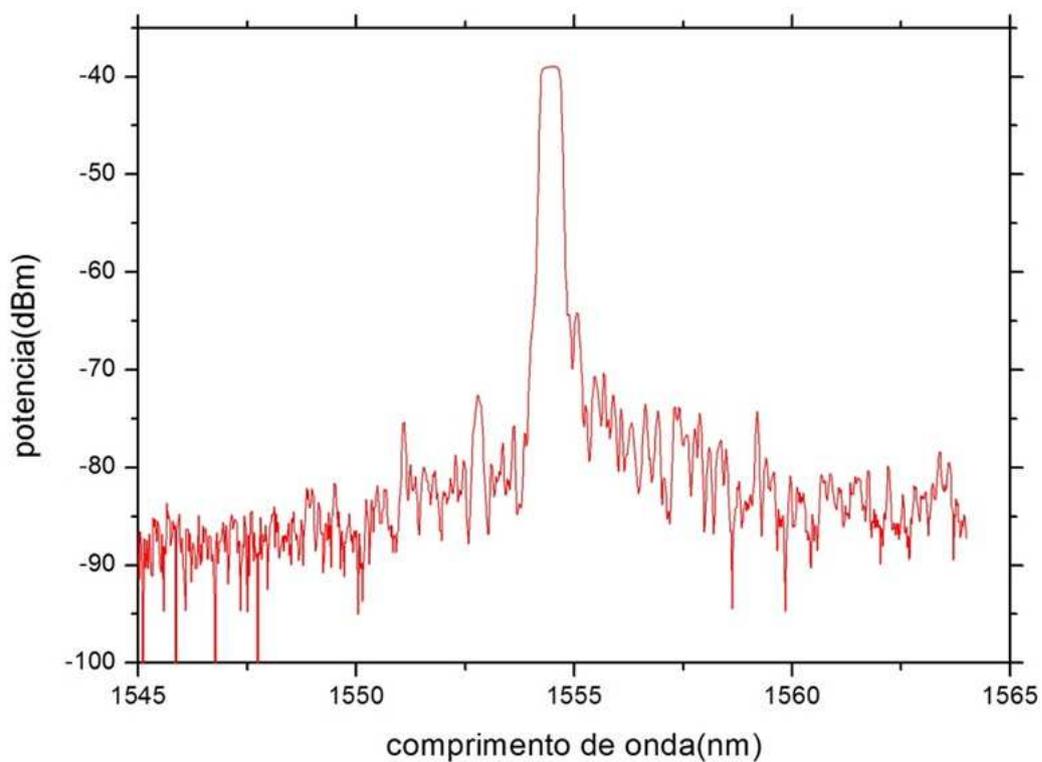


Figura 4.2: Espectro de reflexão da rede 1553,33 nm (1).

Na continuação, observa-se o espectro de 6 redes escolhidas — como foi explicado no início do capítulo — saltando de duas em duas. A ordem foi a

seguinte: 1, 2, 5, 6, 9, 10 (1553,33 - 1554,13 - 1556,55 - 1557,36 - 1559,79 - 1560,61).

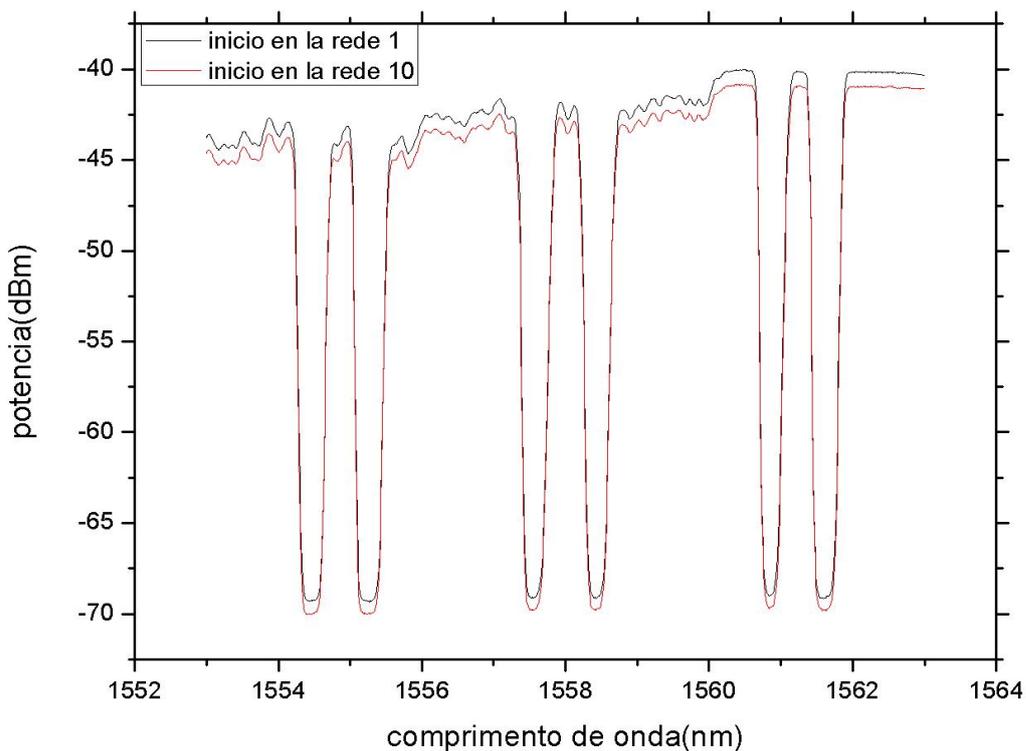


Figura 4.3: Espectro de transmissão das redes 1, 2, 5, 6, 9,10 por ambos extremos.

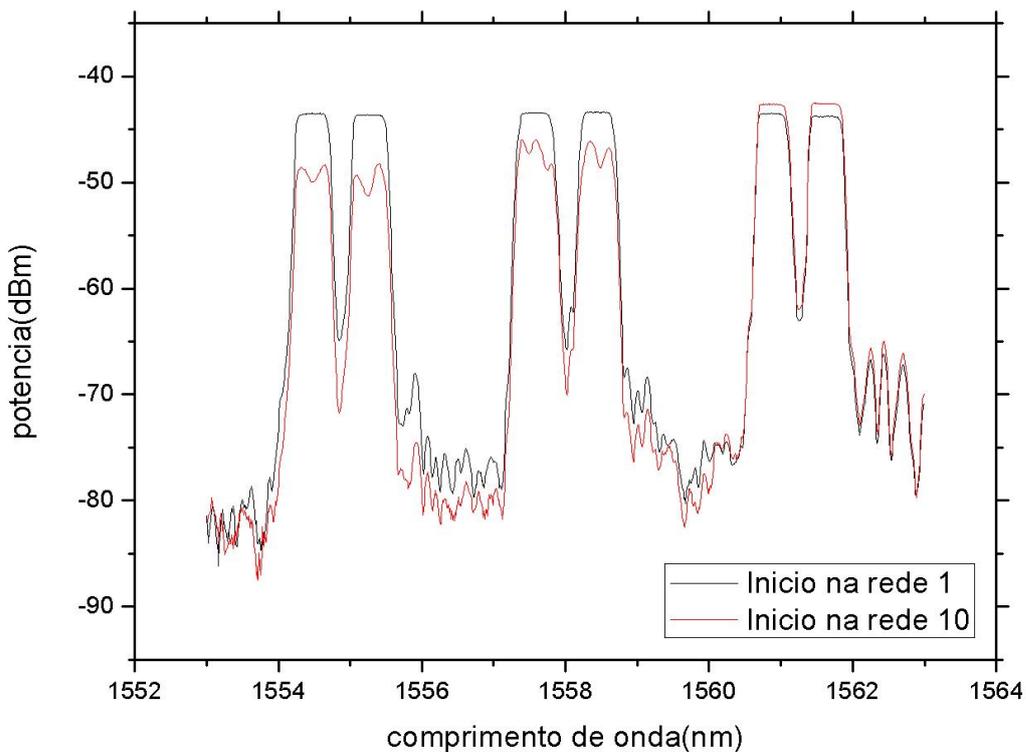


Figura 4.4: Espectro de reflexão das redes 1, 2, 5, 6, 9,10 por ambos extremos.



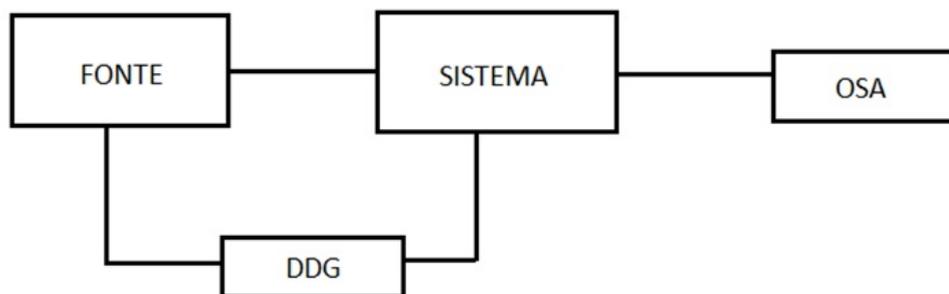


Figura 4.6: Diagrama em blocos do esquema montado para a divisão do pulso por comprimento de onda.

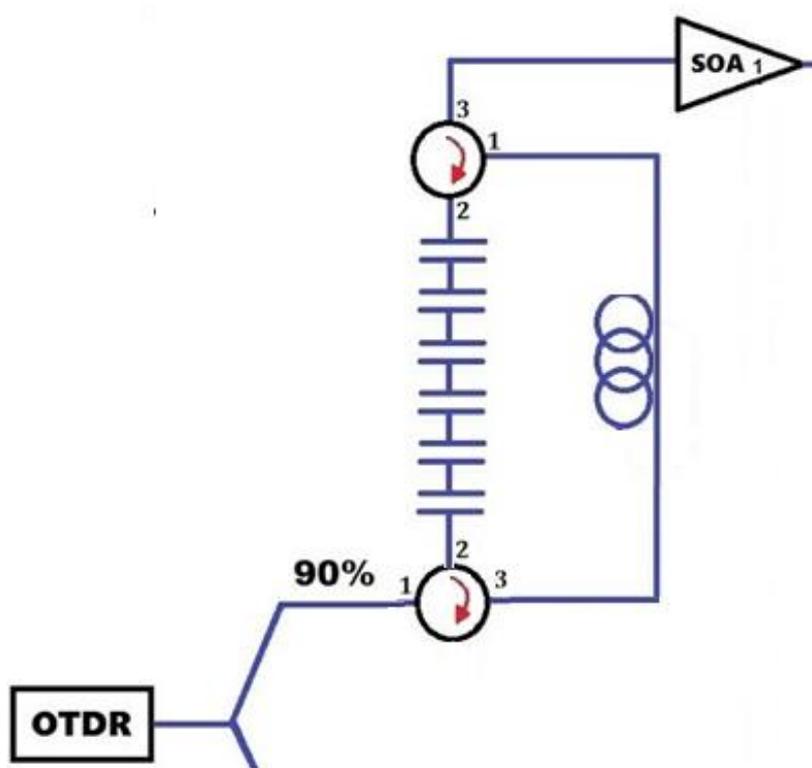


Figura 4.7: Esquema da fonte.

A figura 4.7 é chamada de “Fonte” porque é a fonte de luz pulsada que logo será amplificada. Ela pega todo o espectro do OTDR que entra pela porta 1 do circulator 1. As redes de Bragg refletem nos seus respectivos comprimentos de onda saindo pela porta 3 do circulator 1. Os comprimentos de onda não refletidos passam diretamente, saindo pela porta 3 do circulator 2 e chegando ao SOA antes dos comprimentos de onda refletidos pelas redes, os quais levam mais tempo para chegar ao SOA devido a fibra de atraso. Assim o DDG1 é sincronizado para “trigar” o SOA somente quando os pulsos dos comprimentos

de onda refletidos pelas redes de bragg cheguem nele; desta forma reduzindo nosso espectro inicial ao espectro das próprias redes escolhidas. Então a saída da Fonte é um pulso óptico, contendo o espectro apresentado na Figura 4.8 para o caso das redes 1, 2, 5, 6, 9, 10 conectadas uma seguida da outra.

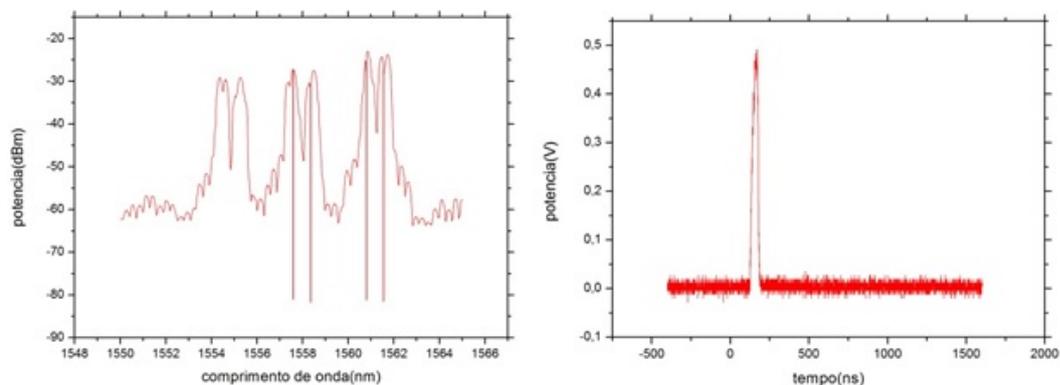


Figura 4.8: Pulso óptico contendo o espectro das redes bragg 1,2,5,6,9,10 que sai da Fonte visto no OSA e no OSC.

Para a amplificação por divisão em comprimentos de onda é necessário separar o pulso da “Fonte” em quatro pulsos separados no tempo, os quais logo serão amplificados individualmente pelo SOA2. A divisão no tempo é feita pelo arranjo feito com as redes de bragg (idênticas as redes usadas na Fonte) conjuntamente com as fibras de atraso de 10.5m (105ns ida e volta).

O espectro do arranjo de redes com as fibras (que se colocam entre elas para separar os pulsos) foi medido por ambos os lados da rede 1, 2, 4, 5, 9, 10. Foi feito a comparação com o laser, com que se fez estas medidas, para saber de quanto eram as perdas das redes com as soldas entres elas e com a fibra de atraso.

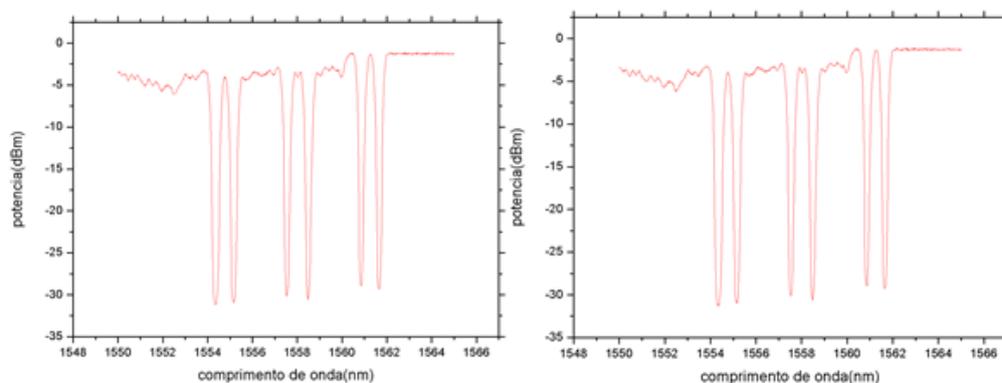


Figura 4.9: Espectro de transmissão das redes 1, 2, 5, 6, 9,10 com a fibra de atraso entre elas. Pelo extremo da rede 1 e pelo extremo da rede 10.

Depois de passar pelas redes bragg, se obtém 6 pulsos divididos em comprimentos de onda que serão amplificados independentemente .

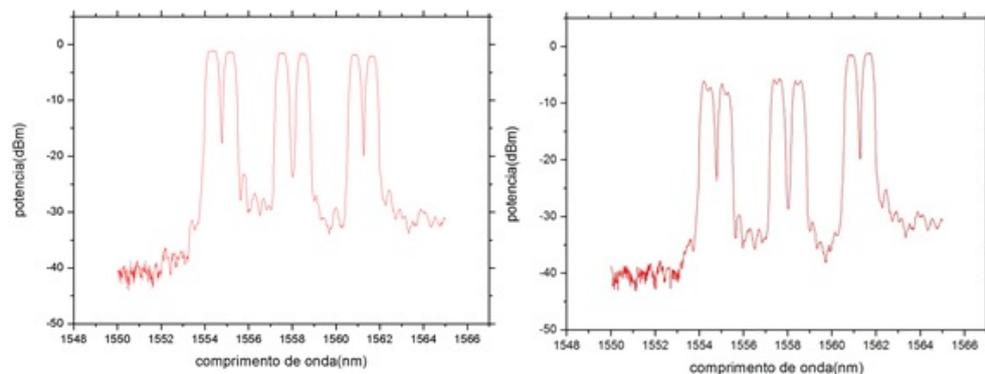


Figura 4.10: Espectro de reflexão das redes 1, 2, 5, 6, 9,10 medido por ambos extremos com a fibra de atraso entre elas.

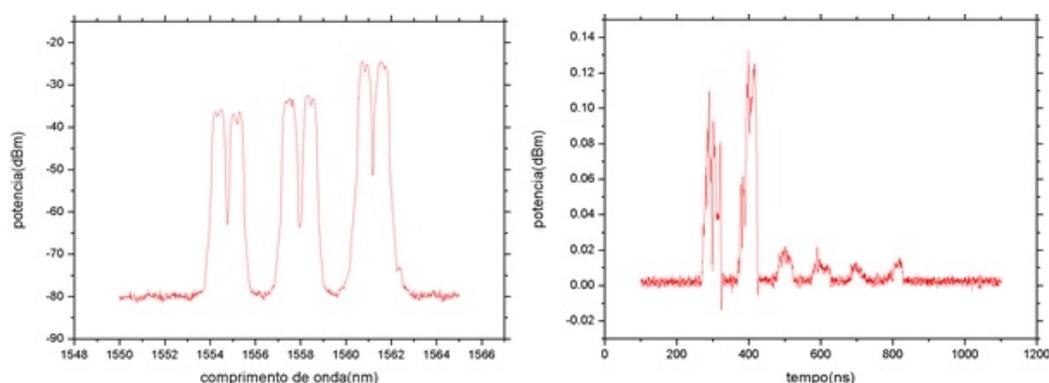


Figura 4.11: Espectro dos pulsos separados pelas redes bragg visto no OSA e no OSC.

O sinal de 90% de nossa fonte colocou-se na porta 1 do circulador 3. Logo, nosso pulso que contém os 6 comprimentos de onda vai refletir seu respectivo comprimento de onda saindo pela porta 3 do circulador 3, seis pulsos separados um do outro na mesma distância. Depois, para amplificar eles um por um, o DDG2 dá 6 pulsos de trigger para o SOA. O primeiro pulso refletido nas redes bragg ocorre a uma distância até o SOA, menos que os demais pulsos que lhe seguem. Contudo, depois de ser amplificado, ele entra no circulador 4 pela porta 1 e tem que ocorrer a uma distância maior que os pulsos seguintes. Estes, anteriormente, demoraram mais em ser amplificados; agora são refletidos antes igualando as distâncias percorridas pelos 6 pulsos. Dessa forma, todos os pulsos se juntam, finalmente, pela porta 3 do circulador 4. Contudo, agora temos um pulso de maior potência pois é o resultado da soma de 6 pulsos amplificados independentemente no SOA. O DDG2 foi configurado para “trigger” o SOA2 no momento exato. O pulso para “trigger” o DDG2 foi tomado de uma das saídas do DDG1. As figuras na continuação mostram os 4 pulsos depois de amplificados.

Outra medida muito importante foi traçar a curva de saturação do SOA,

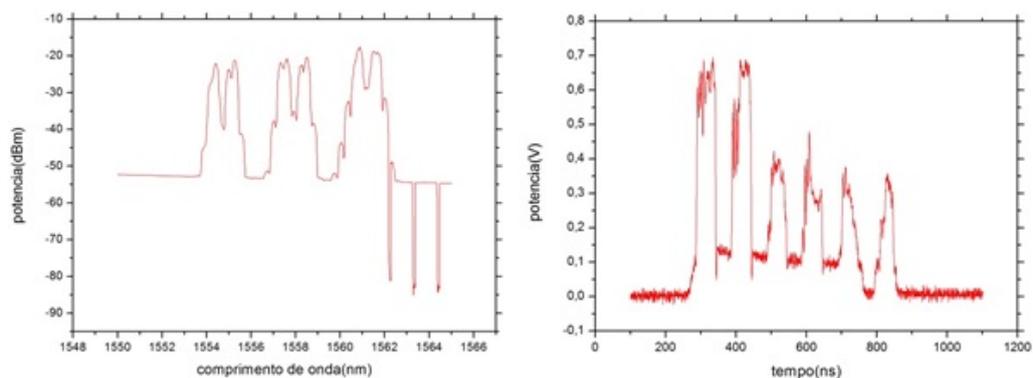


Figura 4.12: Espectro dos pulsos separados pelas redes bragg visto no OSC.

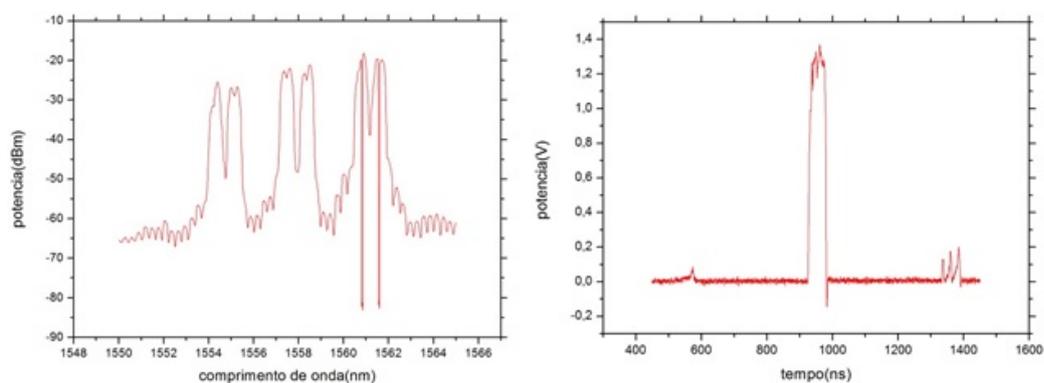


Figura 4.13: Pulsos amplificados pelo SOA2.

lembrar que o SOA 2 que é o usado para a amplificação dos pulsos. Como já foi explicado anteriormente, o pulso da Fonte é dividido novamente por um divisor 90/10, o que vai permitir calibrar os detectores para garantir que não estejam saturados e as medidas estejam certas no osciloscópio. Os valores obtidos foram relacionados na tabela 4.2 de  $V_{in}$  &  $V_{out}$  e a figura 4.14 é sua modelagem.

Na primeira experiência, trabalhamos com uma resistência de 6 ohm para poder proporcionar uma maior corrente ao SOA e obter dele uma maior amplificação.

Tabela 4.2:  $V_{in}$  &  $V_{out}$ .

$V_{in(mv)}$ (10%)	$V_{out(mv)}$ (90%)
1200	2000
600	1900
300	1700
150	1500
75	1300
30	1100

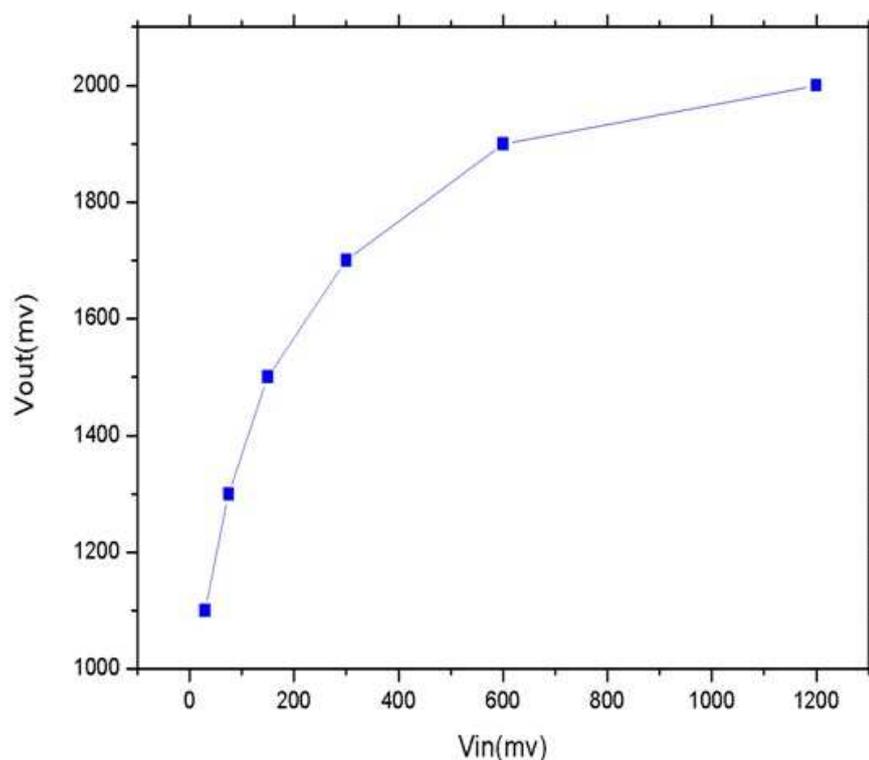


Figura 4.14: Curva de saturação do SOA2.

O primeiro valor de  $V_{in}$  corresponde a potência do pulso que sai da "Fonte", ajustado a atenuação a um valor que não sature o detector e  $V_{out}$  correspondente ao valor na saída do SOA2 (que amplifica os pulsos que saem da fonte sem usar o arranjo de redes bragg para separar o pulsos no tempo). O objetivo é medir o sinal antes e depois do SOA2 sem dividir o pulso por comprimento de onda.

O resultado da divisão de  $(V_{out} / V_{in})$  dá o ganho que se obtém amplificando um pulso só pelo SOA, valor muito importante a ter em mãos para comparar com o ganho obtido ao usar o arranjo de Redes Bragg (que dividem o pulso por comprimento de onda em vários pulsos e logo são amplificados pelo

SOA2). Na continuação se calcula o ganho obtido com a amplificação de um pulso:

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 3000mv/1500mv = 2 \implies 10 * \log(2) = 3dB \quad (4-1)$$

O ganho que se tem amplificando um pulso só utilizando o SOA é de 3dB.

Agora é necessário conhecer quanto foi o ganho que conseguiu-se com nosso esquema de divisão dos pulsos por comprimentos de onda. Para tal, se traçou um gráfico comparando o espectro do sinal na saída de nossa fonte com a saída total de nosso sistema, lembrando que a saída também é um pulso só, resultado de recombinar os comprimentos de onda que foram filtrados pelas Redes Bragg.

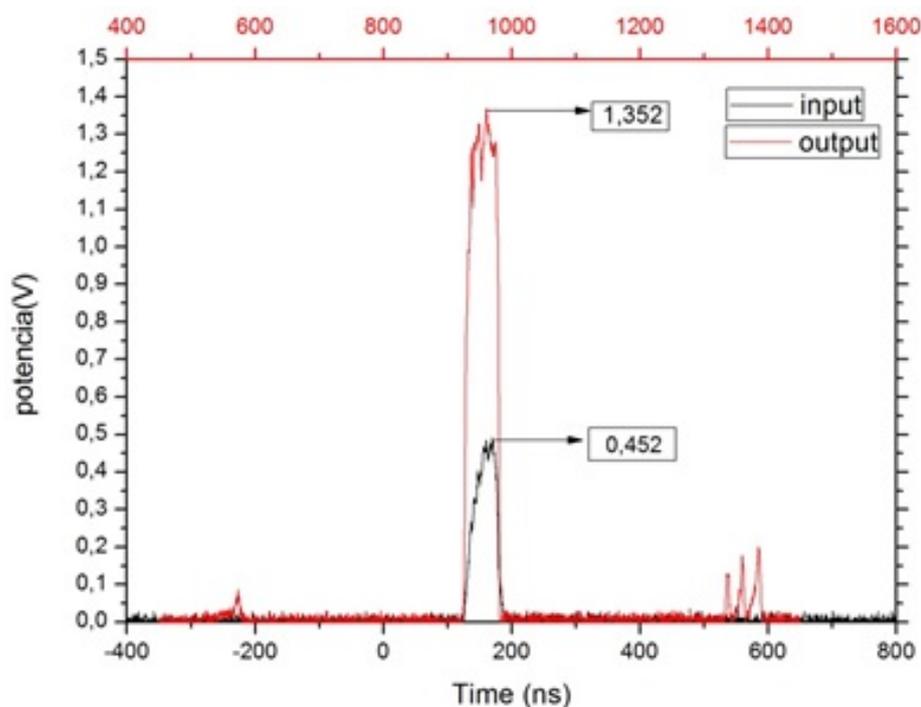


Figura 4.15: Comparação entre a saída da Fonte e a saída total do sistema com divisão dos pulsos por comprimento de onda.

Pelos dados obtidos pela figura, temos que:

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1,352mv}{0,452mv} = 2,99 \implies 10 * \log(2,99) = 4,8dB \quad (4-2)$$

Agora, comparando os dois valores, amplificando um pulso só e pegando na saída do SOA2 (3dB) e o outro resultado que foi medido na saída de nosso sistema (4,8 dB) nos dá quanto temos obtido de ganho com este método. Assim, contornando a saturação do SOA e demonstrando que com o método

utilizado se obtém um aumento do ganho de 2 dB. O valor teórico que poderia ter sido alcançado seria de 7 dB mas ter quase 5dB é um resultado ótimo. Entre as causas de não se ter um maior ganho estão as imperfeições das Redes Bragg, que absorvem em outros comprimentos diferentes. Embora tenha-se procurado uma alternativa de colocar as redes saltando de duas em duas, o resultado sempre será afetado. Devemos também levar em consideração as perdas introduzidas pelos equipamentos usados e as soldas feitas entre as redes e as fibras de atraso.

## 5 Conclusões

Neste último capítulo apresenta-se resumidamente as conclusões gerais obtidas neste trabalho:

Duas novas possibilidades para contornar a saturação do ganho de um amplificador óptico semiconductor foram propostas e desenvolvidas, uma usou-se a divisão por polarização e a outra por comprimento de onda. De maneira geral foi mostrado uma forma de aproveitar melhor a potência máxima que o SOA pode nos dar trabalhando em regime pulsado.

Os resultados em ambos casos mostrou boas concordâncias com as previsões teóricas da amplificação óptica com amplificadores semicondutores. Com relação aos resultados obtidos de foram satisfatórios, mas algumas medidas não foram muito boas foi devido a vários fatores. Na divisão por polarização porque o ângulo na fibra muda muito com qualquer movimento e conexão entre as fibras. Na divisão por comprimento de onda as Redes Bragg, como se mostrou, tinham perdas fora do comprimento de onda de trabalho delas, o que faz que seu desempenho não tenha sido o máximo. Também estão efeitos não esperados do dispositivo que podem ter acontecido por não ter levado em conta o efeito da temperatura

Finalizamos o trabalho deixando vários itens ainda em aberto como a possibilidade de usando a polarização dividir o pulso de entrada em mais vezes para aumentar ainda mais a potência de saída e conseguir um jeito de juntar eles na saída. Também trabalhar com umas Redes Bragg com melhor desempenho que as apresentadas neste trabalho. Utilizar dispositivos que introduzam menos perdas e conseguir um melhor alinhamento óptico do sistema.

Em particular, esse trabalho me propiciou um grande aprendizado na área de montagem e caracterização de dispositivos ópticos. Com relação à montagem, operou-se com diversos equipamentos que são utilizados em comunicações ópticas de maneira geral. Sendo assim, desenvolver essa dissertação foi extremamente gratificante em termos profissionais.

## Referências Bibliográficas

- [1] de FARIA, G. Vilela and J. Von der Weid, System and Method for Increased Power Output of Optical Amplifiers in Pulsed Regime. Ericsson Patent, 2013.
- [2] KEISER, G. Optical Communication Essentials. McGraw-Hill Companies, 2004.
- [3] CAPUTO, C. and Regina, M. Aplicação do OTDR na Análise de Problemas de Atenuação em Fibras Ópticas : Estudo de Casos. McGraw-Hill Companies, vol.5, 2002.
- [4] WOLSZCZAK, S. and Taws, R. Reference Guide to Fiber Optic Testing. Second Edition, vol.1, 2011.
- [5] TIPLER, P. A. Física para Cientistas e Engenheiros. LTC, vol. 2, 2000.
- [6] WUILPART, M. and Grillet, A. Dynamics enhancement of OTDR-based monitoring systems for passive optical networks. Proc. Symp. IEEE/LEOS Benelux Chapter, 2007.
- [7] S. Edition, Reference Guide to Fiber Optic Testing. vol. 1.
- [8] AGRAWAL, G. P. Fiber Optic Communications Systems. Wiley-Interscience, 3.ed, 2002.
- [9] KEISER, G. Optical Fiber Communications. McGraw-Hill, 2.ed, 1993.
- [10] RAMASWAMI, R. and SIVARAJAN, K. N. Optical Networks: A Practical Perspective. McGraw-Hill, 2.ed, 2002.
- [11] GROVE, A. S. Physics and Technology of Semiconductor Devices. John Wiley and Sons, 1967.
- [12] SZE, S. M. Physics of Semiconductor Devices. Wiley-Interscience, 3.ed, 1981.
- [13] CONNELLY, M. J. Semiconductor Optical Amplifiers. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [14] AGRAWAL, G. P. and DUTTA, N. K. Long-Wavelength Semiconductor Lasers. Van Nostrand Reinhold, 1.ed, 1986.
- [15] DURHUUS, T. All Optical Wavelength Conversion by Semiconductor Optical Amplifiers. J. Lightwave Technol., 1996.

- [16] ADAMS, M. J. Semiconductor Lasers for Long-Wavelength Optical-Fiber Communication Systems. Peter Peregrinus, 1.ed, 1987.
- [17] OLSSON, N. A. Lightwave Systems with Optical Amplifiers. J. Lightwave Technol., 1989.
- [18] KASHYAP, R. Fiber Bragg Gratings. Academic Press., 1999.
- [19] OTHONOS, A. and Kalli, K. Fiber Bragg Grating: Fundamentals and Applications in telecommunications and sensing. Artech House, Boston, 1999.