

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

CEATEC

URIEL RAMON CRISÓSTOMO DE MIRANDA

INVESTIGAÇÃO DE UM REGENERADOR  
TOTALMENTE ÓPTICO SINTONIZÁVEL BASEADO  
EM FIBRA ALTAMENTE-NÃO-LINEAR E EFEITO DE  
MISTURA DE QUATRO ONDAS

CAMPINAS

2012

URIEL RAMON CRISÓSTOMO DE MIRANDA

INVESTIGAÇÃO DE UM REGENERADOR  
TOTALMENTE ÓPTICO SINTONIZÁVEL BASEADO  
EM FIBRA ALTAMENTE-NÃO-LINEAR E EFEITO DE  
MISTURA DE QUATRO ONDAS

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do Título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações, ao Programa de Pós-Graduação em Mestrado Profissional em Gerência de Redes de Telecomunicações, Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Eric Alberto de Mello Fagotto

PUC-CAMPINAS

2012

Ficha Catalográfica

Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas e

Informação - SBI - PUC-Campinas

**Pontifícia Universidade Católica de Campinas**  
**Centro de Ciências Ambientais, Exatas e de Tecnologias**

BANCA EXAMINADORA

A minha esposa Hejoyce pelo apoio e paciência,  
aos meus pais pela dedicação e instruções desde  
o princípio de minha carreira estudantil.

# AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Eric A. M. Fagotto,

Orientador e incentivador de meus trabalhos desde as primeiras pesquisas ainda no programa de Iniciação Científica na Faculdade de Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Agradeço pela amizade e providencial orientação em todas as etapas deste estudo.

Ao Prof. Dr. Marcelo Abbade,

Agradeço pelo apoio e discussões que muito agregaram a este estudo.

À minha família,

Agradeço pelo incentivo, suporte e paciência durante o todo o tempo meu envolvimento com este estudo.

*“A vida sem ciência é uma espécie de morte.”*

Socrates

## RESUMO

**MIRANDA, Uriel Ramon Crisóstomo de. Investigação de um Regenerador Totalmente Óptico Sintonizável Baseado em Fibra Altamente Não-linear e Efeito de Mistura de Quatro Ondas. 2013. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão de Redes de Telecomunicações) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Campinas 2013.**

Este trabalho teve como objetivo investigar por meio de simulações um dispositivo sintonizável capaz de regenerar sinais ópticos com modulação NRZ-OOK de 10 Gb/s de maneira totalmente óptica. Como princípio para regeneração empregou-se o efeito de mistura de quatro ondas em dois estágios de fibra altamente-não-linear. Avaliou-se o resultado das simulações através da comparação de estimativas de taxa de erro de bit entre os sinais de entrada e saída do regenerador. Os resultados mostraram que é possível regenerar canais de toda a banda C para sistemas ópticos utilizando o mesmo dispositivo, ajustando-se apenas parâmetros que são configuráveis em dispositivos ópticos comerciais, como potência e frequência de lasers contínuos. Observou-se melhora de no mínimo sete ordens de grandeza para qualquer canal da banda C com BER de entrada abaixo de  $10^{-7}$ . Tais resultados, utilizando-se sempre os mesmos componentes ópticos, sugerem que regeneradores totalmente ópticos sintonizáveis podem ser construídos experimentalmente e poderiam substituir regeneradores elétricos convencionais.



# ABSTRACT

**MIRANDA, Uriel Ramon Crisóstomo de. Investigation of an All-optical Tunable Regenerator Device Based on FMW and HNLF. 2013. Dissertation (Master Degree in Management of Telecommunication Network) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Campinas 2013.**

This study aimed to investigate by means of simulations a tunable device capable of regenerating a NRZ-OOK modulated, 10 Gb/s optical signals in an all-optical way. The principle employed for regenerating was the FWM effect in two stages of DS-HNLF. We evaluated the simulations results by comparing estimated bit error rate at the input and output of the regenerator device. The results suggest that it is possible to regenerate all channels in C-band, for optical systems, using the same device only by adjusting parameters that are settable in commercial optical devices such as optical power and frequency of lasers. There was improvement of at least seven orders of magnitude for any C-band channel with input BER below  $10^{-7}$ . Such results, always using the same optical components, suggest that all-optical tunable regenerators can be constructed experimentally and could replace conventional electrical regenerators.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.1: Sistema DWDM Amplificado.....	34
Figura 2.2.1: Topologias de redes DWDM.....	35
Figura 2.2.2: Diagrama simplificado de um amplificador EDFA.....	36
Figura 2.4.1: Regeneração 3R.....	37
Figura 3.1.1: Produtos de FWM.....	39
Figura 3.2.1: Função de transferência Tipo-S.....	41
Figura 4.2.1: Diagrama de Blocos do Regenerador Totalmente Óptico Sintonizável.....	46
Figura 4.2.2: Esquemático do Regenerador.....	47
Figura 4.2.2A: Detalhamento da Parte A do Esquemático.....	47
Figura 4.2.2B: Detalhamento da Parte B do Esquemático.....	48
Figura 4.2.2C: Detalhamento da Parte C do Esquemático.....	49
Figura 5.1.1: Canal 41 na entrada do RTOS com BER estimada $1,2 \times 10^{-7}$ .....	55
Figura 5.1.2: Canal 41, espectro após propagação na fibra do primeiro estágio.....	56
Figura 5.1.3: Canal 41 na saída do primeiro estágio com BER estimada de $4,2 \times 10^{-13}$ .....	56
Figura 5.1.5: Canal 41 na saída do RTOS com BER estimada de $3,0 \times 10^{-16}$ .....	57
Figura 5.1.6: Canal 41, função de transferência do primeiro estágio.....	58
Figura 5.1.7: Canal 41, função de transferência do segundo estágio.....	59
Figura 5.1.8: Canal 41, função de transferência total do RTOS.....	59
Figura 5.2.1: Espectro do canal 20 após fibra do 1º estágio.....	62
Figura 5.2.2: Espectro do canal 30 após fibra do 1º estágio.....	63
Figura 5.2.3: Espectro do canal 60 após fibra do 1º estágio.....	63
Figura 5.2.4: Diagramas de olho para os canais 20,30 e 60.....	64

# LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1.1: Curvas de atenuação e dispersão cromática para fibras SSMF e DSF. ....	32
Figura adaptada de (Ramaswami, 2002).....	32
Gráfico 5.1.1: Resultados da regeneração para o Canal 41. ....	55
Gráfico 5.2.1: Resultados da regeneração diferentes canais da banda C. ....	61

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 5.1.1: Parâmetros fixos para a fibra HNLF dos dois estágios. ....	53
Tabela 5.1.2: Parâmetros variados na primeira etapa de simulações.....	53
Tabela 5.2.1: Parâmetros variados na segunda etapa de simulações.....	60
Tabela 5.2.2: Parâmetros otimizados para regeneração de canais da banda C. ....	61

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>26</b>
1.1	Motivação	26
1.2	Objetivos do trabalho	27
1.3	Métodos de pesquisa	28
1.4	Organização da dissertação	28
<b>2</b>	<b>REDES ÓPTICAS</b>	<b>30</b>
2.1	Evolução das redes ópticas	30
2.2	Redes DWDM e suas topologias	34
2.3	Amplificadores Ópticos EDFA	36
2.4	Regeneradores Elétricos Convencionais	37
2.5	Regeneração Totalmente Óptica	38
<b>3</b>	<b>REGENERAÇÃO TOTALMENTE ÓPTICA BASEADA EM EFEITO DE MISTURA DE QUATRO ONDAS</b>	<b>39</b>
3.1	Efeito de Mistura de Quatro Ondas – FWM	39
3.2	Regeneração através do FWM	41
<b>4</b>	<b>PROJETO DO REGENERADOR TOTALMENTE ÓPTICO SINTONIZÁVEL</b>	<b>43</b>
4.1	Requisitos	43
4.1.1	<i>Regeneração dos Sinais de Maneira Totalmente Óptica</i>	43
4.1.2	<i>Conservação do comprimento de onda do canal a ser regenerado</i>	44
4.1.3	<i>Sintonização do Regenerador</i>	45
4.2	Diagrama de Blocos do Regenerador Óptico Sintonizável	45
4.3	Estratégia Adotada para as Simulações	49
4.3.1	<i>Primeira Etapa de Simulações</i>	50
4.3.2	<i>Segunda Etapa de Simulações</i>	50
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>52</b>
5.1	Primeira Etapa de Simulações	52
5.2	Segunda Etapa de Simulações	60
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>65</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>66</b>

# 1 INTRODUÇÃO

---

---

## 1.1 Motivação

A Internet está cada vez mais presente no cotidiano da sociedade, participando como importante ferramenta para conectar as pessoas seja no âmbito profissional ou pessoal. Porém, para que fosse possível atingir o seu porte atual, a evolução desta rede mundial de computadores contou com um acelerado desenvolvimento de dispositivos e surgimento de novas tecnologias ao longo dos anos.

As redes ópticas se posicionam nesse contexto com papel fundamental devido a sua alta capacidade sistêmica que permite agregar uma grande quantidade de informações e transmiti-las por grandes distâncias. Uma das tecnologias que viabilizaram as redes ópticas com suas características atuais é o Amplificador EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) que trouxe como grande diferencial a possibilidade de amplificar os sinais ópticos sem necessidade de conversões optoeletrônicas, reduzindo assim os custos das redes e evitando o gargalo eletrônico.

Entretanto, apesar de ter mudado as regras de projetos de redes ópticas, os amplificadores EDFA, assim como qualquer outro dispositivo, não são amplificadores ideais. Cada amplificador, além de amplificar os sinais ópticos, insere também ruído na rede degradando a qualidade dos mesmos. O ruído ASE (*Amplified Spontaneous Emission*), nome dado ao ruído inserido pelos amplificadores ópticos, se acumula a cada estágio de amplificação da rede. A partir de certo ponto, este acúmulo passa a ser limitante para a detecção satisfatória dos sinais ópticos, gerando a necessidade de uma regeneração completa do sinal.

Atualmente, nas redes ópticas comerciais em uso, o processo de regeneração de um sinal óptico é feito no domínio elétrico, ou seja, o sinal óptico é recebido por um dispositivo dotado de um fotodetector e convertido para um sinal elétrico que será regenerado e depois utilizado para modular um laser,

convertendo novamente o sinal para o domínio óptico. Esse processo é custoso, insere latência na rede e leva a transmissão novamente à limitação do chamado gargalo eletrônico.

A motivação para este trabalho é o estudo de um dispositivo capaz de regenerar sinais de maneira totalmente óptica, eliminando pontos de necessidade de conversões optoeletrônicas nas redes ópticas.

## **1.2 Objetivos do trabalho**

O objetivo deste trabalho é investigar por meio de simulações um regenerador totalmente óptico baseado em fibra altamente não-linear que usa o efeito FWM (*Four Wave Mixing*) para regenerar o sinal. O sinal a ser regenerado passa por uma cascata de vários amplificadores para ser regenerado e tem modulação OOK-NRZ (*On-Off Keying – Non Return to Zero*).

Tendo em vista torná-lo um dispositivo comercial, que poderá vir a substituir os regeneradores eletrônicos atuais, o esquemático do regenerador óptico é construído visando manter o comprimento de onda do sinal de entrada, para tal, o regenerador utiliza dois estágios, uma vez que um único estágio de FWM não seria capaz de conservar o comprimento de onda do sinal. Outra característica importante para o regenerador, e que também é o diferencial deste trabalho, é a possibilidade de ser sintonizado para regenerar canais diferentes, ou seja, o mesmo regenerador poderá ser configurado para regenerar diferentes canais padronizados pelo ITU-T para redes DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*). Deste modo, o dispositivo regenerador proposto, poderia ser fabricado utilizando componentes comerciais e empregado em redes DWDM. Em comparação com regeneradores elétricos o regenerador óptico poderia reduzir custos da rede, uma vez que se diminui a necessidade de conversões optoeletrônicas.

### **1.3 Métodos de pesquisa**

Na primeira fase da pesquisa, realizou-se um levantamento da literatura atual envolvendo regeneração totalmente óptica e conceitos importantes relacionados ao FWM.

Na segunda fase, foi projetado um esquemático para simulação no software *VPI Transmission Maker* do regenerador com dois estágios, conservando-se assim o comprimento de onda do sinal a ser regenerado (VPIphotonics).

Na terceira fase, foi selecionado um canal central da grade ITU-T para canais DWDM e variados os parâmetros do regenerador a fim de otimizá-lo para regenerar este canal.

Na quarta e última fase, com os parâmetros fixos para a fibra altamente não-linear, foram realizadas várias simulações para diferentes canais nas quais somente foram variados parâmetros que são configuráveis em dispositivos reais, tais como potência e comprimento de onda dos lasers utilizados. Desse modo, buscou-se estudar a capacidade de sintonização do regenerador.

### **1.4 Organização da dissertação**

No capítulo 1 é fornecida uma visão geral do trabalho, com seus objetivos, justificativa e os resultados esperados.

O capítulo 2 apresenta o contexto atual de redes ópticas, explicando suas topologias e conceitos importantes para o entendimento deste trabalho.

O capítulo 3 apresenta o Efeito de Mistura de Quatro Ondas (*FWM – Four Wave Mixing*), explicando seu funcionamento e consequências, uma vez que este efeito é fundamental para o funcionamento do regenerador.

No capítulo 4 é apresentado o esquemático utilizado para simulação do regenerador totalmente óptico sintonizável e são explicados os seus componentes e funcionalidade.

Já no capítulo 5 são discutidos os resultados obtidos.



No capítulo 6, são apresentadas as conclusões deste estudo, bem como perspectivas para novos trabalhos.

## 2 Redes Ópticas

---

---

Este capítulo apresentará de forma breve a evolução das redes ópticas ao longo dos anos até o momento atual. Serão explicados alguns dispositivos e tecnologias que contribuíram para tal evolução. Em seguida serão explicadas as classificações de redes ópticas e suas topologias. Finalmente, uma discussão será apresentada em relação ao método de regeneração empregado nas atuais redes ópticas comerciais, levantando as vantagens de se regenerar os sinais ópticos de maneira totalmente óptica.

### 2.1 Evolução das redes ópticas

As primeiras transmissões ópticas modernas só foram possíveis devido a duas tecnologias que surgiram na década de sessenta. Os primeiros lasers foram inventados e demonstrados nesta época, permitindo o aproveitamento de sua particular característica, a emissão coerente de luz, para fins de transmissão de dados. A fibra óptica, recém inventada, também já levantava, no meio acadêmico, suspeita de que seria um bom meio para confinar a luz, tal como um cabo metálico é capaz de confinar elétrons. Inicialmente, a limitação das fibras desta época era a atenuação que podia exceder 1000 dB/km. Um fator divisor de águas foi a redução desta atenuação para algo próximo a 20 dB/km no início da década de 70, para transmissões realizadas na região de comprimento de onda de 1000 nm (Huurdeeman, 2003).

As fibras ópticas são fabricadas de sílica e podem ter elementos dopantes. Basicamente possuem três estruturas distintas, núcleo, casca e capa. O núcleo feito de material de índice de refração menor do que a casca permite que a luz se propague através do princípio de reflexão total. A capa serve para proteger a fibra mecanicamente (Maeda, 2009).

As pesquisas relacionadas às transmissões ópticas modernas aumentaram sensivelmente a partir de 1975. Desde então, até o momento atual, a evolução das comunicações ópticas passou por diversas fases que são marcadas pelo advento de uma nova tecnologia, cada uma provocando alterações fundamentais

que mudaram o rumo desta evolução. A primeira geração operava com portadora óptica perto de 850 nm, gerada através de lasers semicondutores GaAs. As primeiras redes comerciais com esta característica, começam a ser implantadas em 1980, operando a taxa de 45 Mb/s e intervalo entre repetidores de 10 km. Desta maneira, as redes ópticas já apresentavam vantagem em relação às redes de cabos coaxiais, uma vez que estas precisam de repetidores a cada 1 km (Ramaswami, 2002).

Certamente que a demanda das redes de telecomunicações da década de 80 não se equipara à demanda dos dias atuais, entretanto já naquela época observou-se o diferencial da fibra óptica em relação a outros meios de transmissão, a alta capacidade sistêmica. Este conceito envolve não somente a taxa de transmissão (B), mas sim o produto desta com a distância entre repetidores (L). O chamado produto BL da segunda geração de redes ópticas pôde ser aumentado, pois passou-se a utilizar lasers semicondutores InGaAsP, capazes de emitir luz com comprimento de onda perto de 1300 nm. Nesta região a atenuação da fibra óptica era de aproximadamente 1 dB/km, portanto menor que em 850 nm (2,5 dB/km), permitindo que taxas perto de 100 Mb/s fossem transmitidas (Agrawal, 2002).

A principal limitação no início da segunda geração de transmissões por fibra óptica deixou de ser a atenuação e passou a ser a dispersão intermodal. Esta dispersão é gerada devido aos múltiplos modos de propagação que são permitidos em fibras multi-modo, até então, o tipo de fibra utilizado. Algumas variantes surgiram, como a fibra de índice gradual, com o intuito de minimizar este efeito. Contudo, o advento da fibra monomodo, com diâmetro de núcleo menor, trouxe novo fôlego a segunda geração de transmissões ópticas. Na fibra monomodo (conhecida pelo acrônimo SSMF - *Standard Single-mode Fiber*), apenas um modo da luz é capaz de se propagar, eliminando o efeito da dispersão intermodal. Além disto, a dispersão cromática que também poderia limitar a transmissão é nula ou muito baixa em comprimentos de ondas próximos à 1310 nm. Estes fatores acumulados permitiram que as transmissões de segunda geração alcançassem maiores distâncias e taxas. Datam de 1988, sistemas comerciais de segunda geração operando com taxa de 1.7 Gb/s com distância entre repetidores de cerca de 50 km (Borne, 2008).

Apesar das transmissões ópticas terem começado em 850 nm e depois migrado para 1300 nm (primeira e segunda janelas), já era de conhecimento do meio científico desde 1979 que a região de menor atenuação da fibra óptica de sílica é a chamada terceira janela, região ao redor de 1500 nm. Nesta região a atenuação da fibra vai de 0.2 a 0.25 db/km aproximadamente. O impedimento para utilização desta janela era, a princípio, o alto valor do coeficiente de dispersão cromática agregado a oscilação em diversos modos longitudinais dos lasers InGaAsP, causando o alargamento dos pulsos ópticos. Devido a isto, para utilizar a terceira janela, iniciando a terceira geração de redes ópticas, desenvolveu-se a fibra DSF (conhecida pelo acrônimo DSF - *Dispersion Shifted Fiber*), cuja curva de dispersão é deslocada para que a dispersão zero se dê perto de 1550 nm. Utilizando-se desta nova fibra e emissores de 1550 nm, a terceira geração de redes ópticas alcançou em 1992 distâncias típicas entre repetidores de 70-80 km com taxa de transmissão de 2,5 Gb/s (Maeda, 2009).

O Gráfico 2.1.1 apresenta a atenuação espectral das fibras SSMF e DSF que pode ser lida, para ambas as fibras, através da linha denominada “Atenuação”, que tem valores indicados no eixo vertical à esquerda do gráfico. As curvas de dispersão cromática que são distintas para cada fibra podem ser lidas através das linhas denominadas “Disp. SSMF” e “Disp. DSF”, que têm valores indicados no eixo vertical à direita do gráfico (Agrawal, 2002).

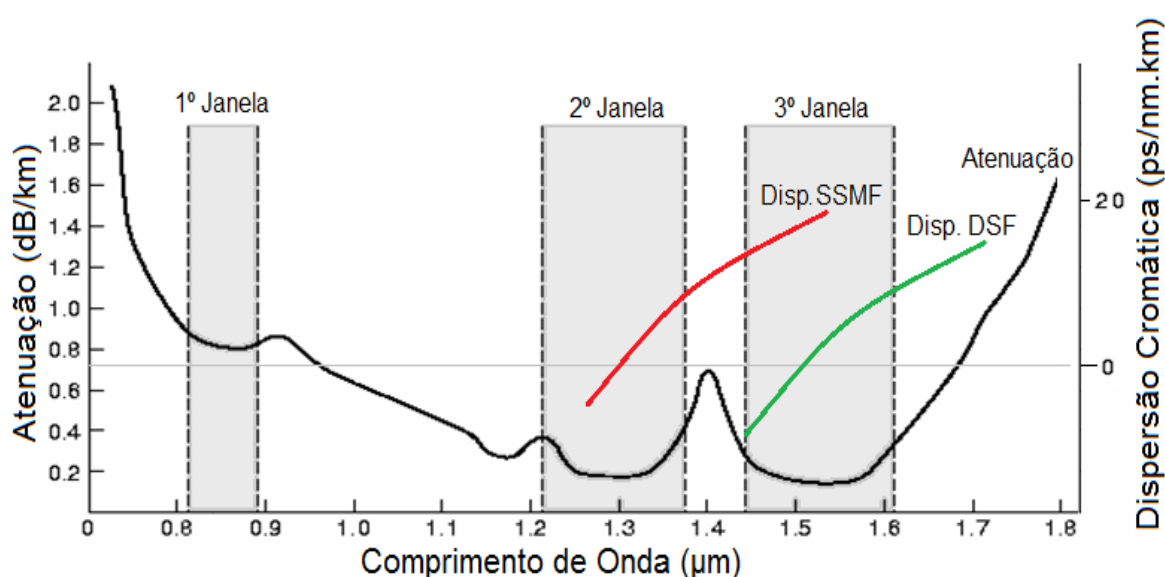


Gráfico 2.1.1: Curvas de atenuação e dispersão cromática para fibras SSMF e DSF.

Figura adaptada de (Ramaswami, 2002).

A quarta geração de redes ópticas inicia-se com o advento dos amplificadores ópticos e dos sistemas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), que em conjunto aumentaram a distância de transmissão e a taxa agregada de transmissão respectivamente. Os amplificadores ópticos EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) realizam sua função sem converter sinais para o domínio elétrico, por isto são chamados totalmente ópticos. Para causar amplificação, a tecnologia EDFA utiliza lasers de bombeio e fibra dopada com érbio, que devido à sua natureza amplifica de maneira satisfatória somente sinais ópticos na terceira janela de transmissão. Esta característica se tornou mais um atrativo para a migração dos sistemas para a região dos 1550 nm (Agrawal, 2002).

A tecnologia WDM agrega vários sinais ópticos para transmissão em uma mesma fibra, caracterizando assim um sistema multi canal. Para agregar e separar os canais, os sistemas WDM utilizam multiplexadores e demultiplexadores ópticos que são passivos, e de baixo custo, se comparados a multiplexadores e demultiplexadores elétricos. Inicialmente, devido à limitação dos componentes ópticos da época os sistemas WDM empregavam espaçamento de 20 nm entre canais, ocupando o espectro desde 1300 a 1600 nm. Contudo, com a evolução dos sistemas, os canais passaram a ter menor espaçamento e ocupar somente a região de 1550 nm. Tais sistemas são chamados DWDM (*Dense WDM*). Atualmente estes sistemas podem apresentar 50 GHz ou menos de espaçamento e agregar pelo menos 160 canais incluindo a banda C e banda L, padronizadas pelo ITU-T (*International Telecommunication Union – Telecommunication*). A banda C vai de 1520 a 1570 nm aproximadamente, enquanto a banda L vai de 1570 a 1620 nm. Ambas as bandas podem ter comercialmente ocupação reduzida e na grande maioria das vezes a banda L funciona como uma extensão da banda C, sendo utilizada somente após a ocupação de toda a banda C (Maeda, 2009).

A Figura 2.1.1 apresenta um sistema DWDM amplificado e seus principais componentes. Com intuito preparar os sinais de dados que passarão pelo sistema DWDM são utilizados equipamentos transponders. Estes tem a função de alocar cada sinal cliente, que pode ser um sinal de hierarquia SDH ou Ethernet, por exemplo, em canal específico de comprimento de onda definido pelo ITU-T (G.694.1, 2012). Os diversos canais são direcionados ao multiplexador ópticos e

agregados em uma mesma fibra. Podem ser inseridos nos sistemas DWDM vários amplificadores ópticos EDFA em pontos distintos. Empregando-se somente canais de 10Gb/s, estimando que um sistema DWDM poderia ter 160 canais, chega-se a taxa agregada bruta em uma única fibra de 1,6 Tb/s. Taxa que pode ser aumentada considerando transponders mais atuais que podem ter taxa de 100 Gb/s. Um sistema DWDM pode propagar seus canais por várias centenas de quilômetros somente com uso de amplificadores EDFA, sem necessidade de conversão destes para o domínio elétrico.

Contudo, cada amplificador EDFA insere ruído ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) no sistema. Este ruído, que se acumula a cada etapa de amplificação, pode ser de tal maneira alto que impede a interpretação correta dos dados, gerando taxa de erro de bit. Por este motivo, os sinais após sofrerem várias etapas de amplificação precisarão ser regenerados, caso a transmissão seja suficientemente longa.

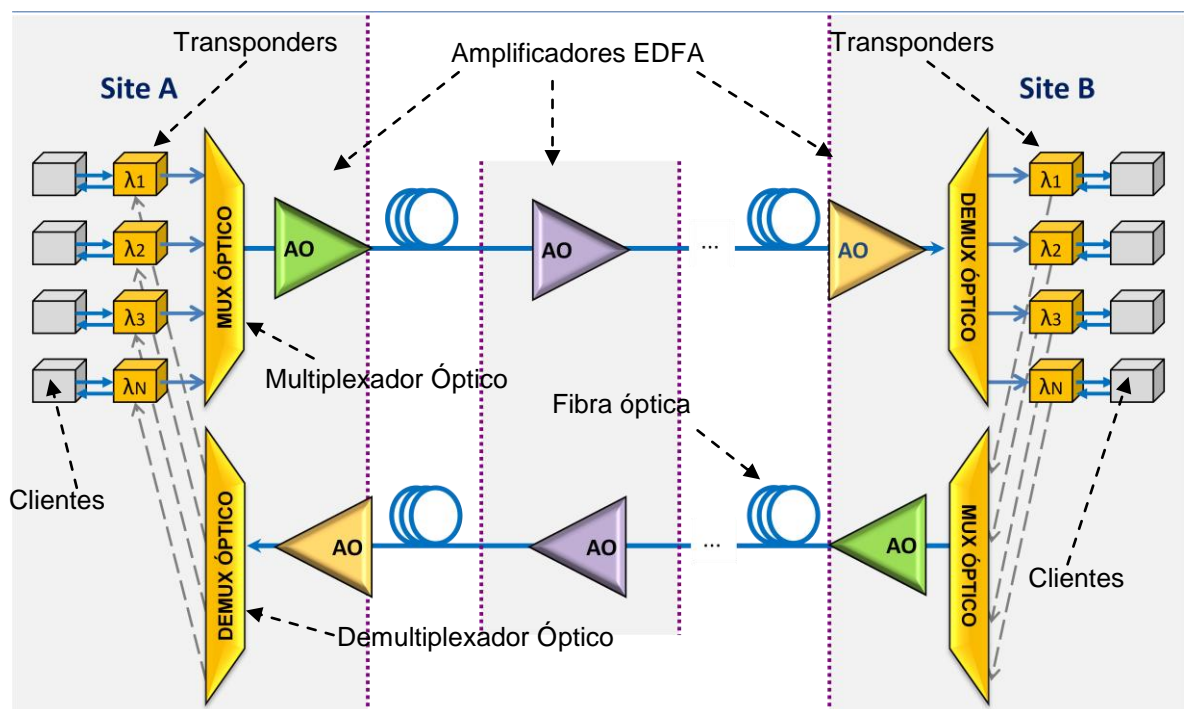


Figura 2.1.1: Sistema DWDM Amplificado.

## 2.2 Redes DWDM e suas topologias

Inicialmente, as redes DWDM se resumiam a topologias ponto-a-ponto implementadas basicamente com multiplexadores e demultiplexadores ópticos.

Os canais de taxas típicas de 2,5 Gb/s eram gerados com transponders transparentes que não realizavam encapsulamento do tributário a ser transmitido. As redes contavam com pouca gerência e as situações de falhas da rede muitas vezes só seriam percebidas pelo equipamento cliente, responsável por enviar seu sinal para o transponder, tipicamente um multiplexador SDH.

Com a evolução das redes DWDM os transponder passam a realizar encapsulamento através do protocolo OTN (*Optical Transport Network*), trazendo mais gerência para dentro das redes DWDM e permitindo a correção de erros de bit através do campo FEC dos quadros OTN. Passam a ser empregados transponders de 10 Gb/s e ROADMs (Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer) de duas direções (grau 2). Os ROADM permitem a realização de *cross* conexões direcionando os canais sem necessidade de convertê-los para o domínio elétrico. O emprego em larga escala dos ROADMs nas redes DWDM também é resultado do esforço de se evitar o gargalo eletrônico (Kartalopoulos, 2001).

Atualmente as redes DWDM contam com taxas de até 100 Gb/s por canal, utilizando modulação DP-QPSK, e ROADMs de grau 9 ou mais, permitindo que a cada nó do sistema um canal tenha até 9 opções de direcionamento. Os ROADM de maiores direções possuem perda interna relativamente alta o que implica em mais amplificadores entre trechos da rede. Com isto há uma necessidade maior de regeneração de canais, mesmo em redes metropolitanas. A Figura 2.2.1 ilustra a evolução das redes DWDM até as redes em malha atuais, implementadas com ROADM (Huawei, 2013).

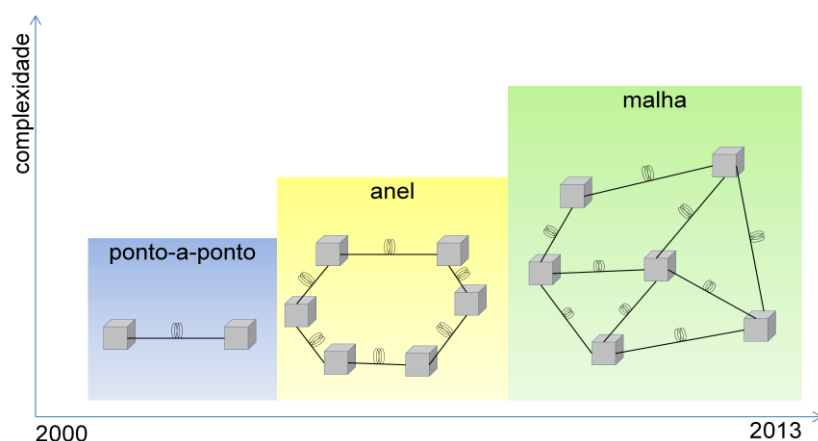


Figura 2.2.1: Topologias de redes DWDM.

### 2.3 Amplificadores Ópticos EDFA

Embora não seja a única técnica para amplificação totalmente óptica, os amplificadores EDFA são os mais comuns nas redes comerciais atuais. Tal fato se deve a sua banda de amplificação que compreende comprimentos de ondas ao redor de 1550 nm, o que coincide com a região espectral de menor atenuação da fibra. Com um único amplificador é possível amplificar toda a banda C, por exemplo, sendo que seu ganho pode passar dos 30 dB. Amplificadores EDFA fabricados com características diferentes podem ser utilizados em diversos pontos de uma rede óptica. O amplificador utilizado no início da transmissão é chamado *Booster*, no meio da transmissão é chamado amplificador de Linha e na recepção é chamado Pré-amplificador. A Figura 2.2.1 apresenta de maneira simplificada o diagrama interno de um amplificador EDFA de um estágio de amplificação (G. Sacchi, 2005).

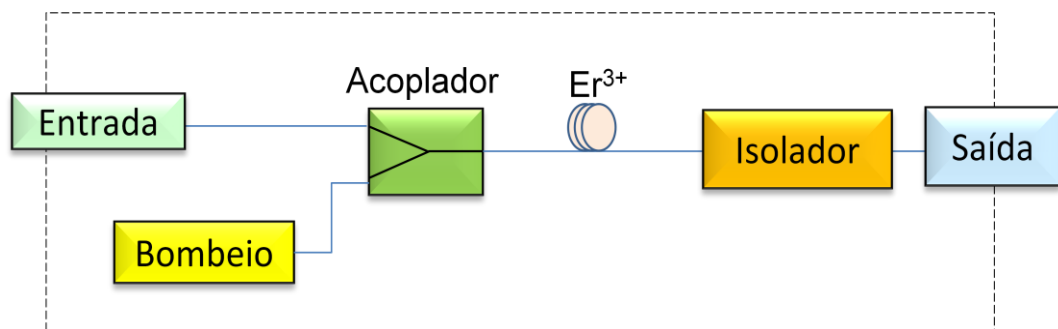


Figura 2.2.2: Diagrama simplificado de um amplificador EDFA.

O amplificador possui uma entrada para um ou mais canais de dados multiplexados a serem amplificados. Internamente, os sinais de dados são acoplados ao laser de bombeio de comprimento de onda típico próximo a 980 ou 1480 nm. Em seguida ambos são direcionados a um trecho de fibra dopada com íons de érbio. Na fibra ocorre a amplificação dos sinais através da transferência de energia do laser de bombeio para os canais de dados por meio de interações com os íons de érbio. A emissão espontânea de fótons que não contribuem para amplificação do canal é a fonte de ruído ASE do amplificado EDFA. O parâmetro que quantifica a degeneração do sinal provocada pelo amplificador EDFA é chamado Figura de Ruído e depende de uma série de fatores como potência de entrada, OSNR do sinal no amplificador, por exemplo (Padtec, 2012).



Mesmo com a inserção de ruído, os amplificadores são de grande importância para que as redes ópticas alcancem longas distancias e são empregados tanto em *backbones*, quanto em redes metropolitanas. Para ambos os tipos de redes, pode ser necessário regenerar os sinais devido principalmente ao acúmulo de ruído ASE dos amplificadores EDFA.

## 2.4 Regeneradores Elétricos Convencionais.

Os regeneradores elétricos utilizados atualmente nas redes de telecomunicações realizam a conversão de sinais ópticos recebidos para o domínio elétrico. Em seguida, é realizado processo de regeneração do sinal conhecido como regeneração 3R. Este processo consiste em três etapas para se chegar a uma regeneração completa.

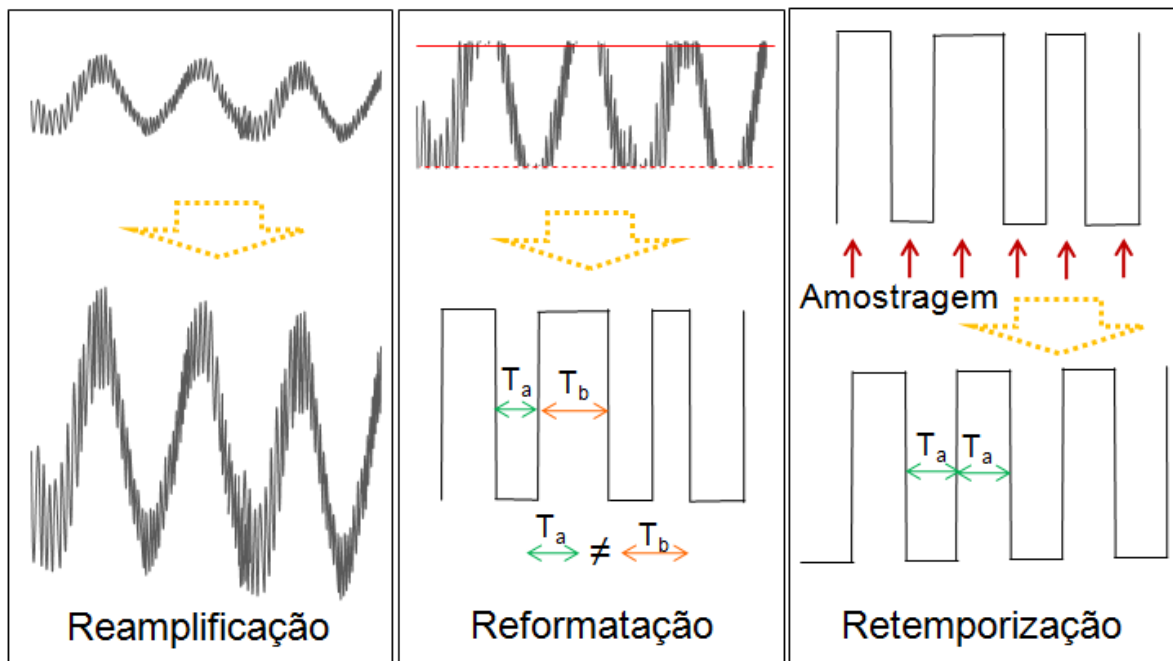


Figura 2.4.1: Regeneração 3R.

A Figura 2.4.1 apresenta cada uma das três etapas da regeneração 3R. A primeira etapa consiste em reamplificar o sinal já no domínio elétrico depois de este ter sido convertido por meio de um fotodetector. Na reformatação, o sinal passa por um processo de saturação de ganho, que faz com que o mesmo assuma o formato mais parecido com a onda quadrada que era no início da transmissão. Contudo, devido à degradação sofrida pelo sinal ao longo da transmissão as bordas de subida e descida de bit para o sinal reformatado podem

estar deslocadas, deixando os bits com períodos diferentes. Na terceira etapa, através da amostragem do sinal em intervalos regulares de tempo, que corresponde ao período de um bit de acordo com a taxa, o sinal recupera sua temporização, ou seja, passa a ter bits com o mesmo período (Laude, 2002).

Após a regeneração realizada no domínio elétrico o sinal precisa novamente alimentar um modulador óptico a fim de que o sinal óptico seja obtido novamente. Este processo de regeneração pode ser considerado custoso e representa custo mais elevado para construção do dispositivo regenerador dos sinais. Além disto, devido às conversões um pouco mais de latência é inserida na transmissão.

## **2.5 Regeneração Totalmente Óptica**

Atualmente, grandes esforços têm sido feitos no sentido de tornar as redes ópticas cada vez mais independentes de conversões eletro-ópticas. É parte deste processo, por exemplo, os ROADMs que buscam direcionar os canais ópticos de uma rede de maneira totalmente óptica. Neste sentido, existem muitas linhas de pesquisa que buscam tornar totalmente ópticos também outros dispositivos empregados nas redes. Um destes dispositivos é o regenerador. A regeneração totalmente óptica evita o gargalo eletrônico e, dependendo de como for construído o dispositivo, pode significar redução de custo para as redes. Tais vantagens podem justificar no futuro a substituição dos regeneradores elétricos convencionais por regeneradores totalmente ópticos (Xiujun Lun, 2003) (Francesca Parmigiani, 2012).

O processo de regeneração de sinais de maneira totalmente óptica pode ser alcançado de várias maneiras (Masayuki Matsumoto, 2012) (Claudio Porzi, 2013) e neste trabalho é investigada a regeneração através do FWM em fibra altamente não-linear (E. A. M. Fagotto, 2011).

### 3 Regeneração Totalmente Óptica Baseada em Efeito de Mistura de Quatro Ondas

---

---

#### 3.1 Efeito de Mistura de Quatro Ondas – FWM

O efeito de mistura de quatro ondas (*FWM - Four Wave Mixing*) é um efeito paramétrico não-linear que envolve interação entre sinais de comprimento de onda diferentes quando acoplados em um único meio. À medida que sinais de frequências  $f_1, f_2$ , se propagam em um único meio, o efeito Kerr (dependência do índice de refração da fibra e da intensidade dos sinais que se propagam por ela) (NORI SHIBATA, 1987) fará com que haja uma interação entre estes sinais e surja um novo sinal de frequência:

$$f_{+,-} = 2f_{1,2} - f_{2,1} \quad (1)$$

A eficiência do FWM depende do casamento de fase dos sinais, e irá acontecer mais acentuadamente para fibras que tenham valores de dispersão baixos. A proximidade de  $f_1$  e  $f_2$  também aumentam a eficiência do FWM, além de outros fatores. A figura 3.1.1 ilustra o FWM entre os dois sinais  $f_1$  e  $f_2$  apresentado as abas laterais  $f_+$  e  $f_-$ , produtos do FWM (Agrawal, 2002).

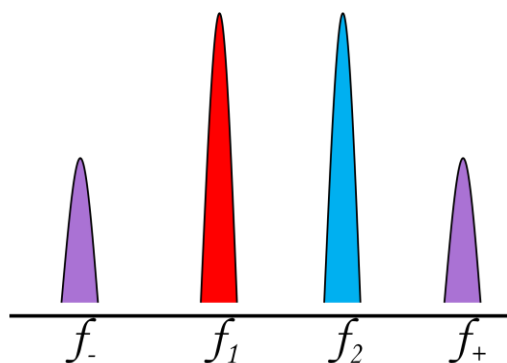


Figura 3.1.1: Produtos de FWM

O efeito FWM pode ser explicado por uma série de quatro equações acopladas que requerem solução numérica (Agrawal, 2002). Para estimar de forma aproximada a potência do produto de FWM, pode-se utilizar a Equação (2), que não considera inversões de fase induzidas por XPM (*Cross Phase*

*Modulation*) e SPM (*Self-Phase-Modulation*), outros efeitos não-lineares. Além disso, considera-se que há pouca depleção dos sinais. Na equação,  $P_+$ ,  $P_1$  e  $P_2$ , são potências ópticas do produto de FWM e dos sinais originais  $f_1$  e  $f_2$ , acoplados em uma fibra respectivamente.  $L$  é o comprimento desta fibra,  $\alpha$  seu coeficiente de atenuação e  $\gamma$  seu índice não-linear.

$$P_+ = \eta \gamma^2 P_2^2 P_1 \exp(-\alpha L) \left[ \frac{1 - \exp(\alpha L)}{\alpha} \right]^2 \quad (2)$$

$\eta$  é a eficiência do FWM que pode ser escrita como

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta k_0'^2} \left\{ 1 + \frac{4 \exp(-\alpha L) \sin(\Delta k_0' L / 2)}{[1 - \exp(-\alpha L)]^2} \right\} \quad (3)$$

$$\Delta k_0' = \Delta k_0 + \gamma (2P_1 - P_2) \left[ \frac{1 - \exp(-\alpha L_{eff})}{\alpha L_{eff}} \right] \quad (4)$$

$$L_{eff} = \left[ \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \right] \quad (5)$$

e

$$\Delta k_0 \approx 2\pi c^3 f_0 S_0 \left( \frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_0} \right) \left( \frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1} \right)^2 \quad (6)$$

Os parâmetros  $\Delta k_0'$ ,  $L_{eff}$  e  $f_0$  são respectivamente o fator de incompatibilidade não-linear, área efetiva e frequência de referência da fibra para dispersão zero. Na próxima seção será apresentado como o FWM pode ser utilizado para regenerar sinais de maneira totalmente óptica (E. A. M. Fagotto U. R., 2013).

### 3.2 Regeneração através do FWM

A regeneração 2R (reamplificação e reformatação) totalmente óptica de sinais NRZ-OOK pode ser alcançada por meio do aproveitamento do produto de primeira ordem do efeito não-linear FWM (Four-Wave-Mixing) gerado em fibra altamente-não-linear (E. A. M. Fagotto U. R., 2013). Para isto, pode-se implementar, em um dispositivo regenerador, uma função de transferência, que devido ao seu formato é denominada Tipo-S. A Figura 3.2.1 ilustra como a função de transferência Tipo-S pode ser utilizada para fins de regeneração. O sinal degenerado de entrada possui variação de potência para os níveis de bits zeros ( $\Delta N_B$ ) e uns ( $\Delta N_A$ ), devido ao ruído acumulado na transmissão. A função de transferência de Tipo-S permite que a variação de potência de entrada, desde que contida entre  $\Delta N_B$  ou entre  $\Delta N_A$  seja, seja convertida em nível alto e nível baixo para o sinal regenerado. Tal processo permite que haja compressão do ruído de nível zero e de nível um.

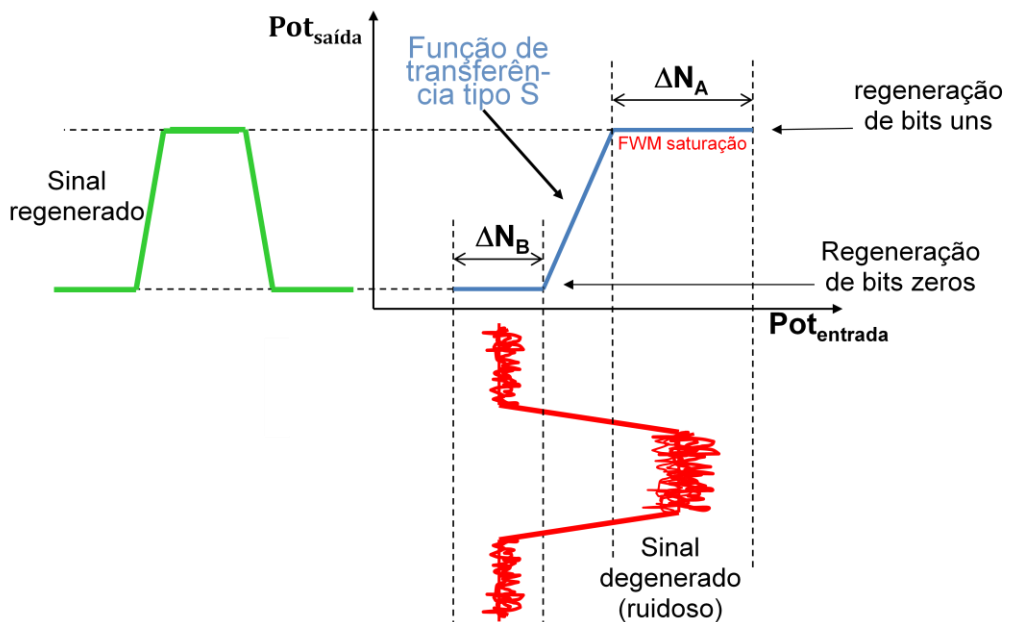


Figura 3.2.1: Função de transferência Tipo-S

A Figura 3.2.2 apresenta como o FWM pode ser utilizado para alcançar a função de Tipo-S em um dispositivo regenerador. São acoplados em uma mesma fibra um sinal  $f_{sinal}$  modulado em amplitude e um laser contínuo  $f_{cw}$  (*cw* – *continuous wave*). É aproveitada a componente  $f$  mais próxima do sinal. Nela

serão reproduzidos os bits do sinal, porém se o dispositivo for bem calibrado haverá ainda a compressão dos bits ruidosos por meio da saturação do FWM.

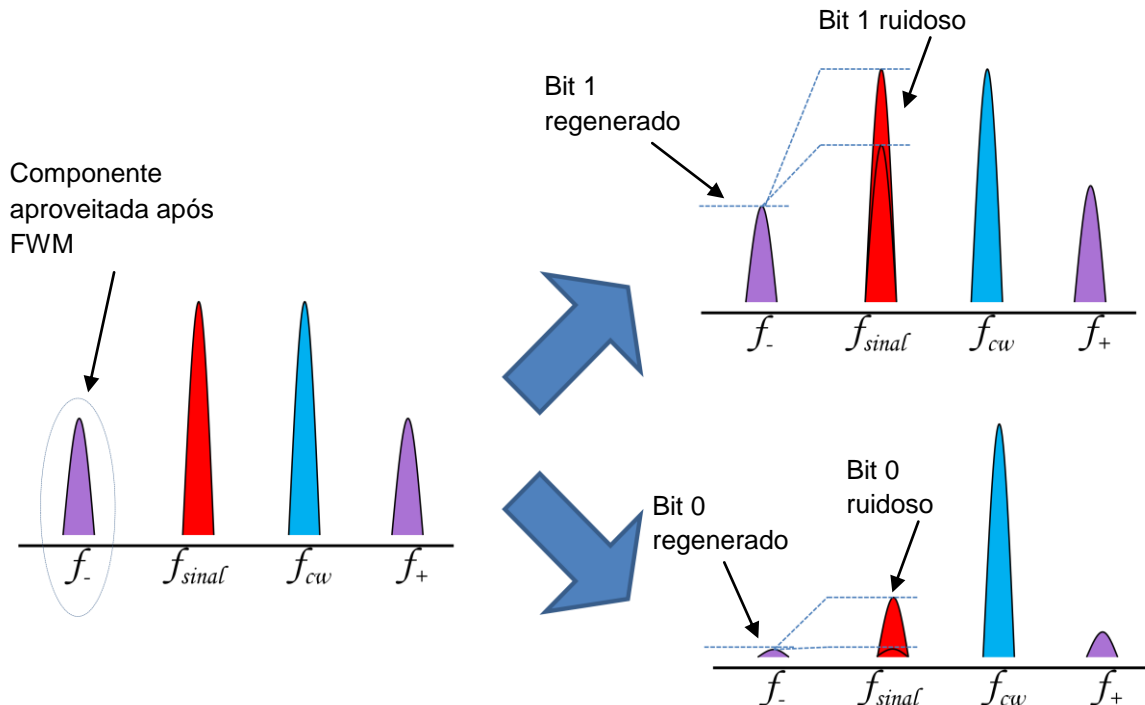


Figura 3.2.2: Regeneração por meio do FWM.

Entretanto, após a regeneração provida através da função de Tipo-S, o sinal estará deslocado de sua frequência original. Para trazer o sinal novamente para sua frequência original pode-se implementar outro estágio de regeneração escolhendo apropriadamente a frequência do laser *cw*. Poderá ser necessário também amplificar o sinal de saída uma vez que a amplitude da aba aproveitada como sinal regenerado pode ser menor do que a amplitude original do sinal. Neste trabalho, a função de Tipo-S foi escolhida para ser investigada no processo de regeneração de sinais ópticos. No próximo capítulo serão apresentados os requisitos considerados para o regenerador totalmente óptico que incluem arranjos para evitar a troca de frequência do sinal provocado pelo FWM.

## 4 Projeto do Regenerador Totalmente Óptico Sintonizável

---

---

Primeiramente, este capítulo apresentará os requisitos considerados na concepção do projeto do Regenerador Totalmente Óptico Sintonizável, doravante denominado simplesmente pelo acrônimo RTOS. Em seguida, será apresentado o esquemático construído para simulações e seus componentes. Finalmente, será apresentada a estratégia escolhida para as simulações realizadas e seus objetivos.

### 4.1 Requisitos

As subseções seguintes apresentam três requisitos para o projeto do RTOS. O primeiro requisito o diferencia dos regeneradores elétricos convencionais utilizados atualmente, tornando-o mais vantajoso no aspecto que envolve a não conversão de sinais ópticos para elétricos. Os outros dois requisitos buscam agregar ao regenerador características que já são presentes nos regeneradores elétricos convencionais e, portanto, precisam também estar presentes em regeneradores totalmente ópticos para que estes venham a se tornar comerciais.

#### 4.1.1 Regeneração dos Sinais de Maneira Totalmente Óptica

Neste primeiro requisito encontra-se o diferencial do Regenerador proposto neste trabalho em relação aos regeneradores elétricos convencionais que realizam conversões opto-elétricas. Com o intuito de evitar o gargalo eletrônico, considerou-se como requisito para o regenerador proposto neste estudo a necessidade de se regenerar sinais ópticos de maneira totalmente óptica. Para isto, escolheu-se como princípio o FWM em fibra altamente-não-linear (*DS-HNLF - Dispersion Shifted-High Non-Linear Fiber*). Dentre outras consequentes vantagens desta alternativa de regeneração para sinais ópticos podem-se citar a menor inserção de latência nas redes e uma possível redução de custos de

fabricação, devido redução de componentes eletrônicos utilizados no projeto do regenerador.

#### *4.1.2 Conservação do comprimento de onda do canal a ser regenerado.*

Nas redes ópticas DWDM comerciais, quando um canal de dados precisa ser regenerado em algum nó da rede, na grande maioria das vezes, deseja-se manter para a portadora óptica dos dados regenerados o mesmo comprimento de onda de antes da regeneração. Isto porque, cada canal ocupa uma região do espectro no meio de transmissão e deve respeitar os canais adjacentes que são responsáveis por tráfegos diferentes. No processo de regeneração convencional que processa os sinais no domínio elétrico, a conservação do comprimento de onda dos canais é atingida com certa facilidade, pois os sinais elétricos regenerados são utilizados para modular lasers que são sintonizáveis. Atualmente, os lasers sintonizáveis têm custo viável, são componentes largamente empregados na fabricação de equipamentos ópticos e, tipicamente, podem ser sintonizados em qualquer canal de uma das bandas padronizadas pelo ITU-T para sistemas DWDM (CIVCOM, 2013).

Visando agregar características que permitam torná-lo um dispositivo comercial, o segundo requisito considerado essencial para o RTOS foi a necessidade de se conservar o comprimento de onda original do sinal a ser regenerado. Desta forma, o regenerador proposto neste trabalho teria característica semelhante ao regenerador optoeletrônico convencional em relação à conservação de comprimento de onda dos sinais.

Uma vez que o RTOS proposto baseia-se em FWM e para regenerar o sinal utiliza-se de um dos produtos de primeira ordem deste efeito, foi necessário empregar dois estágios no projeto do RTOS, tornando-o conservador de comprimento de onda do sinal original a ser regenerado. Ao passar pelo primeiro estágio de regeneração, o produto de FWM aproveitado encontra-se deslocado no espectro. Contudo, o segundo estágio do regenerador teve seus parâmetros ajustados justamente para aproveitar o produto de FWM do segundo estágio coincidente com o comprimento de onda original do sinal.



### 4.1.3 Sintonização do Regenerador

Atualmente, os regeneradores elétricos utilizados nas redes ópticas podem ser sintonizados para trabalhar regenerando qualquer um dos canais de uma das bandas reservadas pelo ITU-T para sistemas DWDM (Padtec, 2012). Esta característica confere a estes regeneradores maior possibilidade de padronização de produção, além de tornar as redes mais baratas à medida que diminui a quantidade de placas sobressalentes que necessitam ser compradas e mantidas em estoques para utilização em caso de falha das placas principais.

Para justificar a importância desta característica de sintonização, pode-se, como exemplo, considerar uma rede DWDM que, em algum de seus nós, regenera 40 canais com regeneradores elétricos convencionais. Para garantir a confiabilidade da rede e a rápida recuperação em caso de falhas, além das 40 unidades que ficarão em operação, uma para cada canal, o administrador da rede compraria e manteria a sua disposição outras unidades sobressalentes. Se os regeneradores não fossem sintonizáveis seria necessário comprar uma unidade sobressalente para cada canal, pois não é possível prever qual regenerador, referente à qual canal, irá falhar. No entanto, se o regenerador pode ser configurado previamente para regenerar qualquer canal, a quantidade de unidades sobressalentes pode ser bastante reduzida, pois qualquer uma delas poderia ser configurada para trabalhar regenerando qualquer um dos canais que venha a apresentar problema.

Os regeneradores elétricos comerciais nem sempre foram sintonizáveis ao longo da evolução das redes ópticas, porém, a partir do momento que a tecnologia de lasers sintonizáveis se fez disponível e com custo viável, rapidamente essa característica passou a ser um requisito para a arquitetura de regeneradores. Desta forma, para que o regenerador óptico sintonizável proposto por este trabalho possa se tornar comercial, é necessário que o mesmo tenha também esta característica.

## 4.2 Diagrama de Blocos do Regenerador Óptico Sintonizável

A Fig. 4.2.1a apresenta o diagrama de blocos do primeiro estágio do RTOS baseado em FWM que explora o limiar entre a regeneração e o *crossstalk* gerado

por esse efeito (E. A. M. Fagotto M. L., 2011). Para que o FWM ocorra, o sinal degradado de frequência  $f_{s1}$  passa por um amplificador EDFA e tem sua amplitude elevada para funcionar com uma fonte de bombeio modulada. Esta é acoplada através de um MUX óptico a um laser  $cw_1$  (continuous wave) de frequência  $f_{cw1}$  em fibra HNL-DSF. O produto de primeira ordem de FWM na saída da fibra pode ser encontrado nas frequências

$$f_{+1,-1} = 2f_{s1,cw1} - f_{cw1,s1} \quad (7)$$

Um filtro passa-faixa foi colocado na saída do primeiro estágio do RTOS para filtrar  $f_{1+}$ , a componente do produto de FWM que será aproveitada no segundo estágio por ser mais próxima da frequência do sinal  $f_{s1}$ . A Fig. 4.2.1b apresenta o diagrama de blocos completo do regenerador incluindo o segundo estágio. Este é necessário, pois o FWM não conserva a frequência original do sinal a ser regenerado. O segundo estágio tem como principal função trazer novamente o sinal regenerado para sua frequência original.

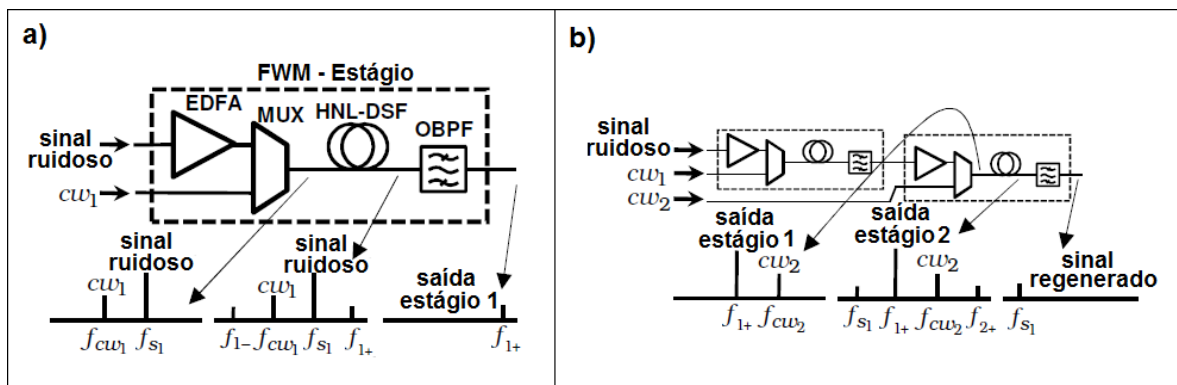


Figura 4.2.1: Diagrama de Blocos do Regenerador Totalmente Óptico Sintonizável.

O segundo estágio do RTOS possui os mesmos componentes do primeiro, porém as frequências do sinal, laser contínuo e filtro são deslocadas em relação as do primeiro estágio. Desta forma, a frequência do segundo laser contínuo  $f_{cw2}$ , é escolhida para que o resultado do FWM do segundo estágio seja o sinal  $f_{s1}$  regenerado. O segundo estágio também conta com um filtro passa-faixa centralizado em  $f_{s1}$  a fim de filtrar o sinal regenerado e eliminar parte do ruído resultante do processo.

A Fig. 4.2.2 apresenta o esquemático do Regenerador Totalmente Óptico Sintonizável utilizado para simulações no software VPI Transmission Maker. Para melhor explicação da arquitetura do Regenerador, o esquemático é apresentado dividido nas partes A, B1, B2, C1 e C2 que serão detalhadas a seguir.

A Fig. 4.2.2A apresenta os componentes utilizados na parte A do esquemático. Esta parte tem por função simular uma rede óptica com vários amplificadores ópticos EDFA que degeneram o sinal de entrada gerado por um laser com modulação NRZ-OOK e taxa de transmissão de 10 Gb/s. A quantidade de amplificadores cascadeados é definida com a utilização da ferramenta de *Loop*, que faz o sinal passar várias vezes pelos amplificadores e atenuadores representados. Escolhendo o número de laços, pode-se chegar a uma BER estimada para o sinal de entrada na parte B do esquemático.

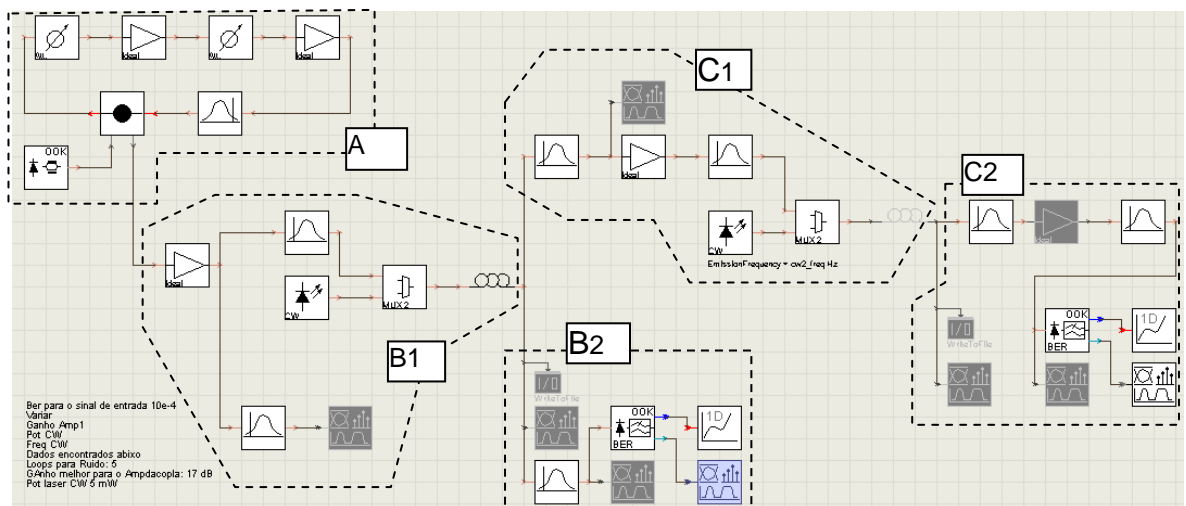


Figura 4.2.2: Esquemático do Regenerador.

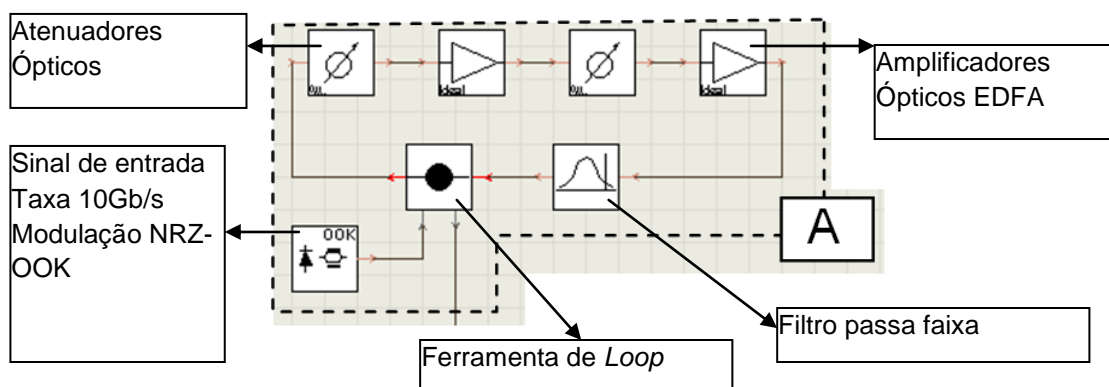


Figura 4.2.2A: Detalhamento da Parte A do Esquemático.

A parte B do esquemático, detalhada na Fig. 4.2.2 B1, apresenta o primeiro estágio do Regenerador. O amplificador é utilizado para dar ganho ao sinal a ser regenerado e fazer com que este se torne uma fonte de bombeio modulada. Após o amplificador o sinal por um filtro passa-faixa centralizado no comprimento de onda do canal, que tem por objetivo filtrar parte do ruído ASE gerado pelo amplificador. Em seguida, o sinal é direcionado para um multiplexador óptico, que acopla o sinal a um laser contínuo  $cw_1$ , o que permite que o FWM aconteça na fibra altamente não-linear.

A Fig. 4.2.2.B2 apresenta um conjunto de ferramentas disponíveis no software VPI para análise de sinais ópticos. Através destas ferramentas o sinal resultante do primeiro estágio pode ser analisado no domínio da frequência e também no domínio do tempo. A principal ferramenta é destacada e consiste em um estimador de BER para sinais OOK. Este utiliza o método estocástico e permite organizar resultados de varreduras de diversos parâmetros em forma de gráfico. As varreduras utilizadas otimizar o desempenho do regenerador serão apresentadas no capítulo de Resultados.

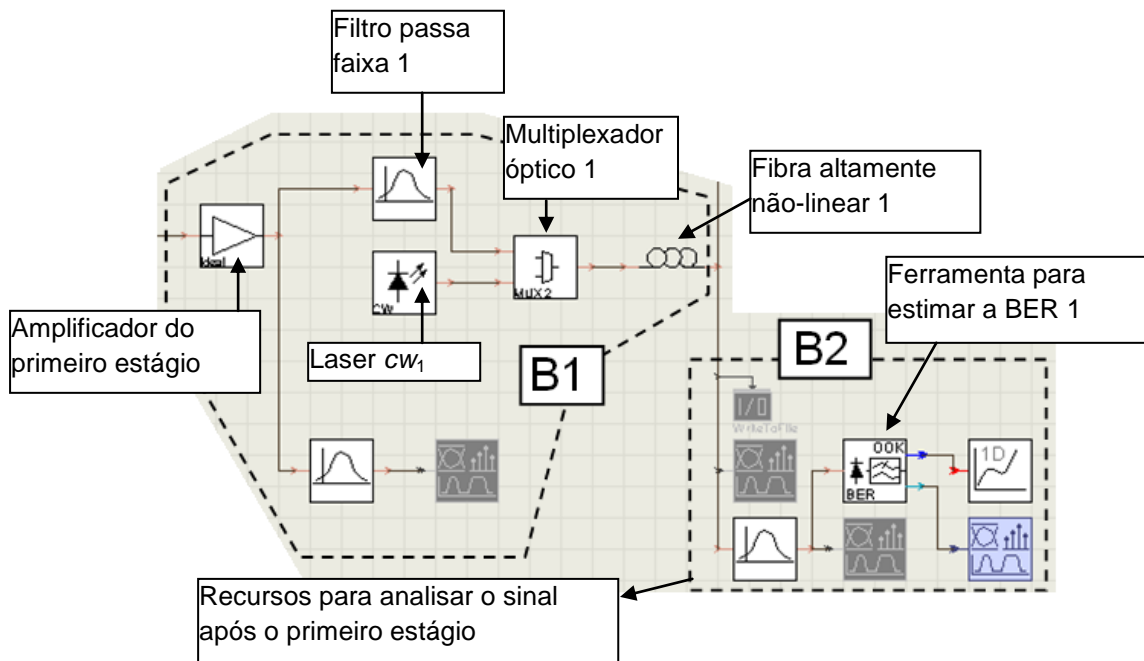


Figura 4.2.2B: Detalhamento da Parte B do Esquemático.

A Figura 4.2.2.C1 apresenta o segundo estágio do Regenerador. O sinal resultante do primeiro estágio passa por um filtro passa faixa, que tem por função filtrar a componente resultante do FWM mais próxima da frequência original do

sinal. Esta componente é então direcionada a um amplificador que, através de seu ganho, irá transformá-la em uma fonte de bombeio modulada para o segundo estágio. Esta fonte de bombeio modulada então é acoplada ao laser contínuo  $cw_2$ . Escolhendo corretamente o comprimento de onda do laser  $cw_2$ , pode-se fazer com que o sinal retorne ao seu comprimento de onda original. A Fig. 4.2.2.C2 apresenta um conjunto de ferramentas do software VPI que permite analisar o sinal. Destaca-se novamente a mesma ferramenta utilizada para estimar a BER, porém colocada no final do segundo estágio a fim de se obter os resultados finais do Regenerador.

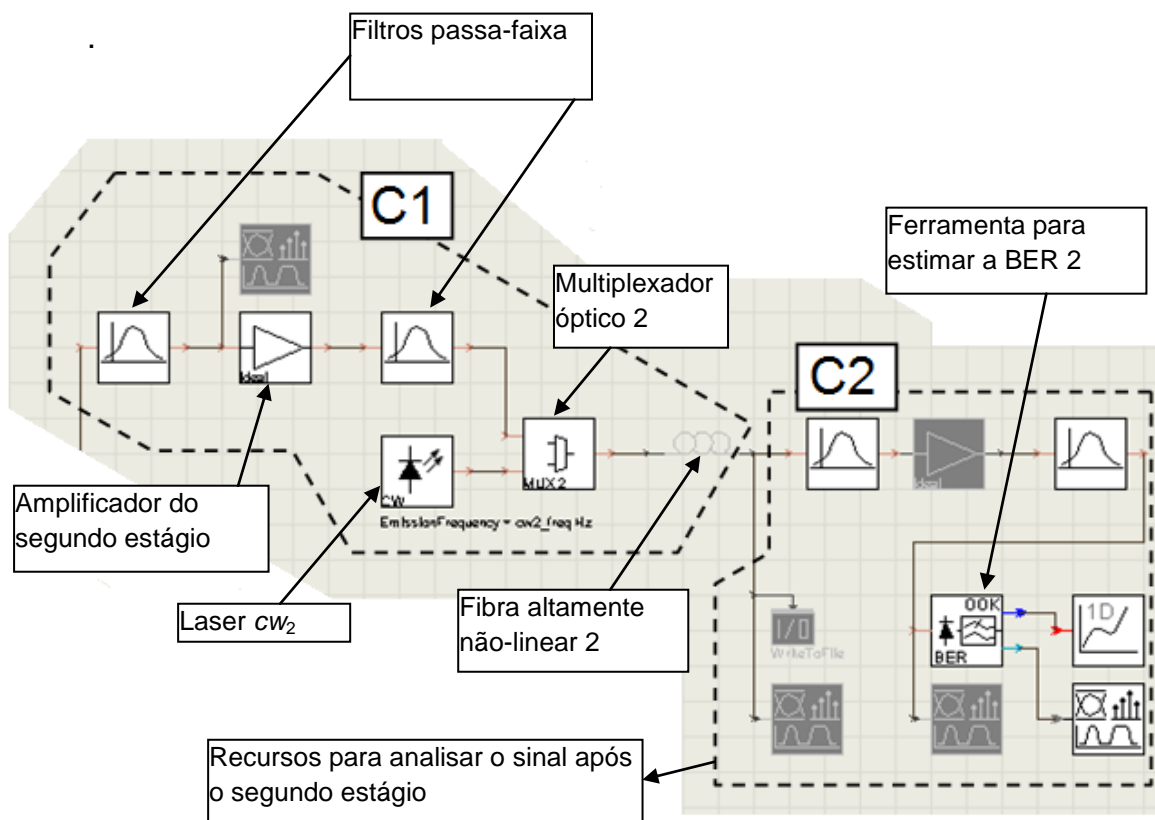


Figura 4.2.2C: Detalhamento da Parte C do Esquemático.

### 4.3 Estratégia Adotada para as Simulações

Com os requisitos e arquitetura do RTOS definidos, estabeleceu-se a estratégia para realização das simulações. A estratégia será apresentada dividida em duas etapas. Na primeira etapa foram feitas varreduras de alguns dos parâmetros da fibra altamente-não-linear empregada. O intuito desta primeira etapa foi obter, a partir da regeneração de um canal guia, valores otimizados para

alguns parâmetros das fibras utilizadas nos dois estágios do RTOS. As características dos trechos de fibra definidas por esta primeira etapa de simulações foram mantidas para a segunda etapa. Esta consistiu em variar a frequência do sinal de entrada do Regenerador e alterar somente parâmetros dos lasers *cw* e amplificadores utilizados no processo de regeneração. Variando-se somente estes parâmetros e conservando as fibras definidas na primeira etapa, torna-se possível construir o regenerador proposto neste estudo utilizando-se componentes ópticos disponíveis comercialmente.

#### *4.3.1 Primeira Etapa de Simulações.*

A banda C, padronizada pelo ITU-T, é a mais utilizada para os sistemas ópticos atuais que empregam largamente a tecnologia DWDM. Comercialmente esta banda é composta por até 80 canais espaçados em 50 GHz (G.694.1, 2012). Por este motivo, o RTOS foi dimensionado para a Banda C buscando-se regenerar diversos canais sem alteração das fibras altamente não-lineares utilizadas.

Como ponto de partida para a primeira etapa de simulações, escolheu-se para a entrada do Regenerador, um sinal de 194.1 THz, que comercialmente é denominado canal 41. Esta escolha se deve ao fato de este canal estar no centro da Banda C utilizada comercialmente. Assim, elegeu-se um sinal guia para escolha dos parâmetros da fibra altamente não-linear empregada no primeiro e segundo estágios do Regenerador.

A primeira etapa de simulações foi ainda subdividida em duas partes, sendo uma varredura de parâmetros para a fibra do primeiro estágio e uma segunda varredura de parâmetros para a fibra do segundo estágio. Os parâmetros utilizados em ambas as varreduras serão apresentados no capítulo de Resultados, juntamente com os resultados obtidos para esta primeira etapa de simulações.

#### *4.3.2 Segunda Etapa de Simulações.*

A segunda etapa de simulações consistiu em manter os parâmetros encontrados para a fibra altamente não-linear empregada no primeiro e segundo

estágios do regenerador, e realizar novas varreduras variando a frequência do sinal de entrada, ou seja, variando o canal de entrada do RTOS. A segunda etapa preocupou-se em confirmar a possibilidade de regeneração de diversos canais da Banda C sem alteração dos parâmetros definidos para a fibra altamente não-linear. Os resultados desta segunda etapa de simulações serão apresentados no capítulo de Resultados a seguir.

## 5 Resultados

---

---

Este capítulo trata dos resultados obtidos com o RTOS. Primeiramente, serão apresentados os resultados iniciais que serviram para definição das características das fibras altamente não-lineares utilizadas no primeiro e segundo estágios do regenerador, contemplando assim a primeira etapa de simulações. Em seguida, serão apresentados os resultados obtidos na segunda etapa de simulações, na qual foram regenerados diferentes canais da grade ITU-T para sistemas DWDM. Tais resultados foram obtidos mantendo-se os parâmetros encontrados na primeira etapa. Parâmetros Iniciais para a fibra altamente não-linear.

### 5.1 Primeira Etapa de Simulações

A primeira etapa de simulações teve o objetivo de encontrar os melhores valores para alguns dos parâmetros das fibras altamente-não-lineares utilizadas no projeto do RTOS. Foi utilizado como entrada para o RTOS um sinal óptico de 10 Gb/s, modulação NRZ-OOK e portadora em 194,1 THz, que nesta frequência é comercialmente denominado canal 41. As simulações realizaram-se com 2048 bits. A Tabela 5.1.1 apresenta os parâmetros que não foram variados nas simulações, na qual  $\alpha$  é a atenuação na fibra em dB/km,  $D_\lambda$  é a dispersão da fibra na  $f_0$  (frequência de referência) em  $s/m^2$ ,  $S_\lambda$  é a inclinação da dispersão da fibra a partir de  $f_0$  em  $s/m^3$ ,  $n$  é o índice não-linear da fibra em  $m^2/W$  e  $A_{eff}$  é a área efetiva da fibra em  $\mu m^2$ .

Os parâmetros fixos, não incluídos nas varreduras das simulações, foram definidos a partir de valores convencionais para fibras altamente-não-lineares e utilizados para os dois trechos de fibra referentes a cada um dos estágios do RTOS. A  $f_0$  não está incluída na tabela 5.1.1, pois foi um dos parâmetros variados na primeira etapa de simulações, admitindo-se que uma fibra pode ter sua  $f_0$  escolhida no processo de fabricação da mesma.



<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
$\alpha$ (dB/km)	0.7
$D_\lambda$ (s/m <sup>2</sup> )	0
$S_\lambda$ (s/m <sup>3</sup> )	23
$n$ (m <sup>2</sup> /W)	$2,6 e^{-20}$
$A_{eff}$ (μm <sup>2</sup> )	6

Tabela 5.1.1: Parâmetros fixos para a fibra HNLF dos dois estágios.

A Tabela 5.1.2 apresenta os parâmetros da fibra altamente-não-linear utilizados na varredura para otimização do primeiro e segundo estágios do RTOS. Na mesma tabela também são apresentados os valores mínimos e máximos para a variação de cada parâmetro e os valores otimizados obtidos no final da primeira etapa de simulações. Os parâmetros  $G_x$ ,  $L_x$ ,  $f_{o_x}$ ,  $f_{c_{w_x}}$  e  $P_{c_{w_x}}$  são respectivamente o ganho de acoplamento do sinal, comprimento da fibra, frequência de referência da fibra, frequência do laser  $c_{w_1}$  e potência do laser  $c_{w_2}$ . Os índices 1 e 2 referem-se ao primeiro e segundo estágios do RTOS.

	<i>Parâmetro</i>	<i>Valor Mínimo</i>	<i>Valor Máximo</i>	<i>Valores Otimizados (canal 41)</i>
Primeiro Estágio	$G_1$ (dB)	10	20	18
	$L_1$ (m)	1600	2500	2000
	$f_{o_1}$ (THz)	193,0	194,5	193.2
	$f_{c_{w_1}}$ (THz)	194,2	194,8	194,45
	$P_{c_{w_1}}$ (mW)	0,1	100	6,6
Segundo Estágio	$G_2$ (dB)	0	25	10
	$L_2$ (m)	1500	2500	2200
	$f_{o_2}$ (THz)	193,0	193,7	192.8
	$f_{c_{w_2}}$ (THz)	192,5	193,8	193,4
	$P_{c_{w_2}}$ (mW)	0,1	100	72,3

Tabela 5.1.2: Parâmetros variados na primeira etapa de simulações.

A margem de valores utilizada para varredura dos ganhos de acoplamento, tanto do primeiro quanto do segundo estágio, foram baseadas em amplificadores

ópticos comerciais (Padtec, Manual Técnico de Produtos da Plataforma LighrPad i1600G, 2013) com o intuito de não ser um fator limitante para o RTOS se tornar um dispositivo comercial. Os lasers cw tiveram suas potências limitadas a 150 mW nas simulações, com o intuito de diminuir o custo de uma possível produção comercial do RTOS, uma vez que quanto menor a potência de um laser cw, menor seu preço no mercado de dispositivos ópticos.

Após a otimização dos parâmetros apresentados pela Tabela 5.1.2, foram gerados, utilizando o mesmo canal 41, outros sinais de entrada com BER estimadas diferentes. Para obter estes sinais de entrada foram utilizadas cascatas com diferentes quantidades de amplificadores, obtendo-se sinais de qualidades diferentes, ou seja, com BER estimada maior ou menor dependendo do número de amplificadores usados para degenerar o sinal de entrada do RTOS. O Gráfico 5.1.1 apresenta a evolução da regeneração sofrida por estes diferentes sinais ao passarem pelo RTOS. A BER foi estimada em três pontos, sendo o primeiro na entrada do RTOS, em seguida na saída do primeiro estágio e finalmente na saída do segundo estágio. A amostra neste último ponto consiste no resultado final da regeneração alcançada pelo RTOS para o Canal 41.

Com os parâmetros otimizados e diferentes sinais de entrada, houve regeneração para todos os casos como mostra o Gráfico 5.1.1. Entretanto, para sinais com BER de entrada acima de  $10^{-6}$  a regeneração foi apenas de duas ou três ordens de grandeza para a BER de saída. Para a regeneração de sinais de entrada com BER estimada de ordem de grandeza abaixo de  $10^{-7}$ , o sinal de saída pôde ser considerado livre de erros (*error free*), uma vez que a BER estimada após atuação do RTOS foi abaixo de  $10^{-15}$ . Para apresentação mais detalhada dos resultados, incluindo diagramas de olho e análise do espectro dos sinais, escolheu-se a simulação na qual se utilizou um sinal de entrada de BER estimada em  $1,2 \times 10^{-7}$ , que obteve regeneração melhorando a BER em nove ordens de grandeza. Esta escolha é reforçada pelo fato da ordem de grandeza da BER de entrada de  $10^{-7}$  não ser considerada adequada para sistemas ópticos, e a BER estimada de  $3,0 \times 10^{-16}$ , obtida para o sinal de saída do RTOS, estar abaixo do limiar de *error free* (Maeda, 2009).

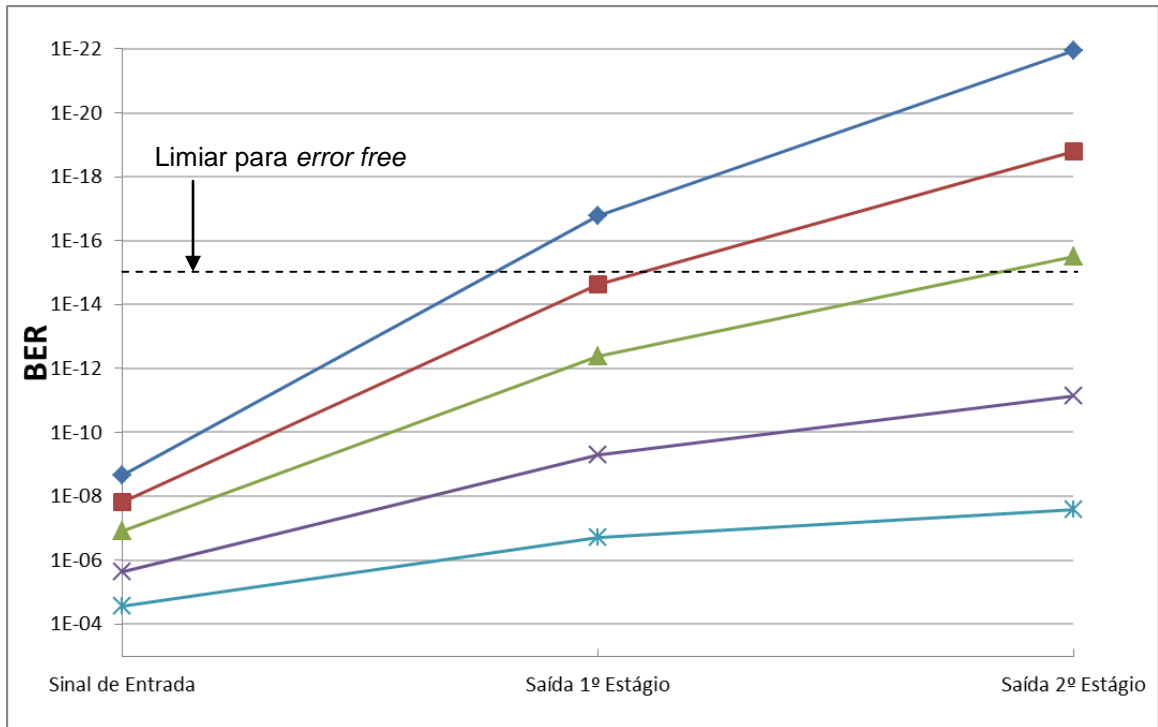


Gráfico 5.1.1: Resultados da regeneração para o Canal 41.

O diagrama de olho do sinal de entrada com BER estimada em  $1,2 \times 10^{-7}$  é apresentado pela Figura 5.1.1. A Figura 5.1.2 apresenta o espectro do sinal após a multiplexação com o laser  $cw_1$  e propagação no trecho de fibra do primeiro estágio do RTOS. É destacado o sinal deslocado correspondente ao produto de FWM de primeira ordem utilizado como sinal de entrada para o segundo estágio do regenerador. A Figura 5.1.3 apresenta o diagrama de olho para o sinal de saída do primeiro estágio que teve BER estimada em  $4,2 \times 10^{-13}$  resultante do processo de regeneração que aconteceu no primeiro estágio do RTOS.

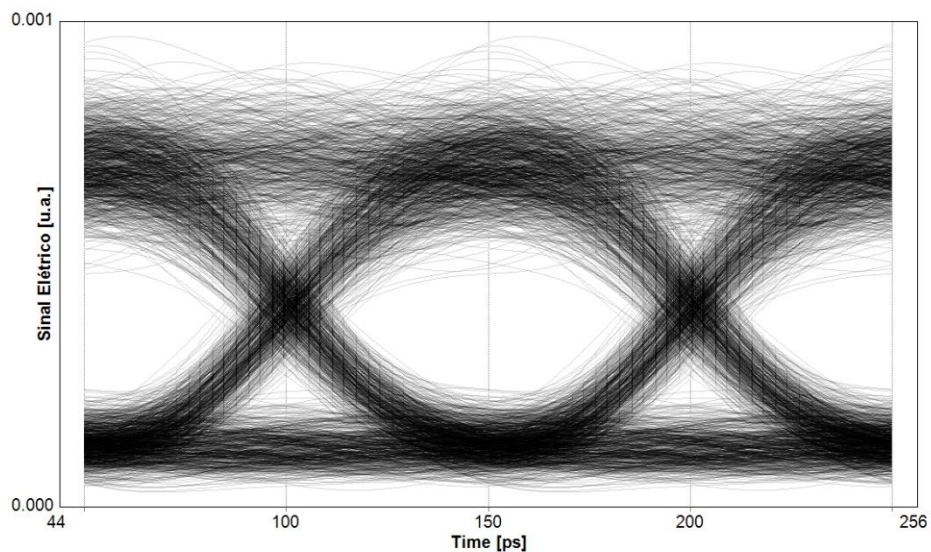


Figura 5.1.1: Canal 41 na entrada do RTOS com BER estimada  $1,2 \times 10^{-7}$ .

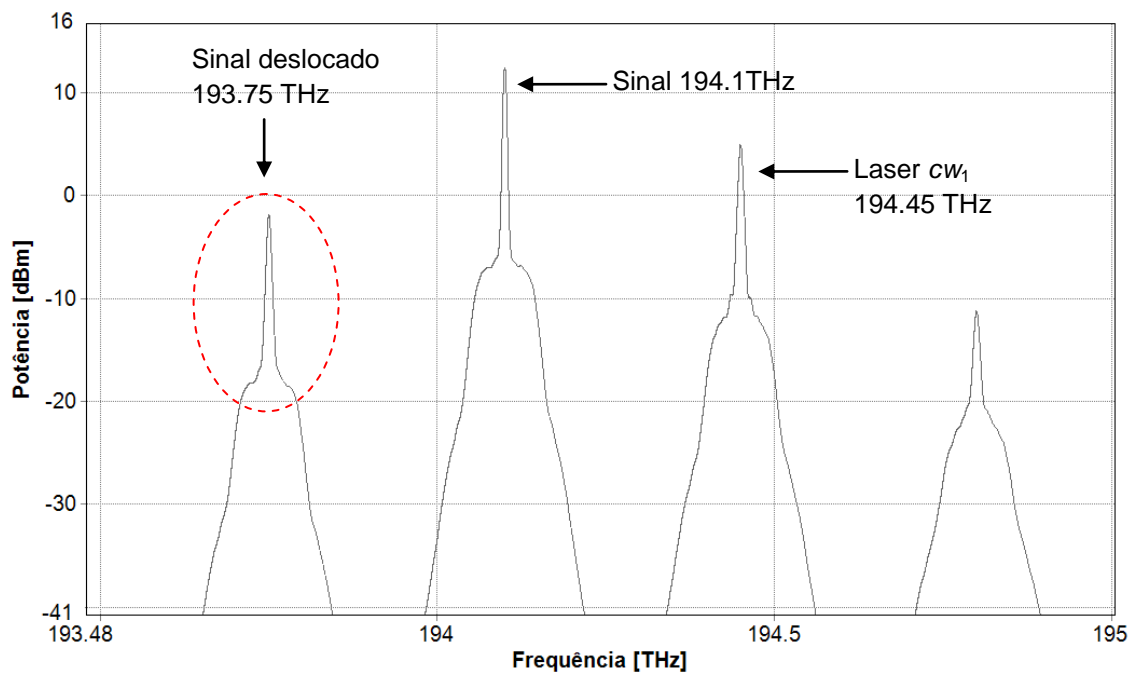


Figura 5.1.2: Canal 41, espectro após propagação na fibra do primeiro estágio.

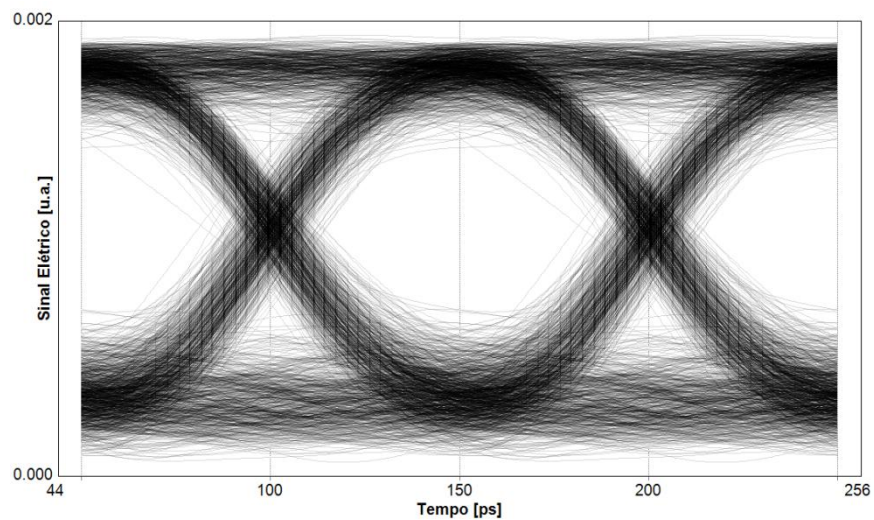


Figura 5.1.3: Canal 41 na saída do primeiro estágio com BER estimada de  $4,2 \times 10^{-13}$ .

O sinal deslocado resultante do primeiro estágio passa por um filtro óptico passa-faixa de frequência central de 193.75 THz e entra no segundo estágio do RTOS. A Figura 5.1.4 apresenta o espectro do sinal após a multiplexação com o laser  $cw_2$  e propagação no trecho de fibra do segundo estágio do RTOS. É destacado o sinal de saída do regenerador com frequência de 194.1 THz, mesmo comprimento de onda do sinal de entrada. O espaçamento adequado através da

escolha de frequência do laser  $cw_2$  permite que o RTOS seja conservador do comprimento de onda do sinal de entrada.

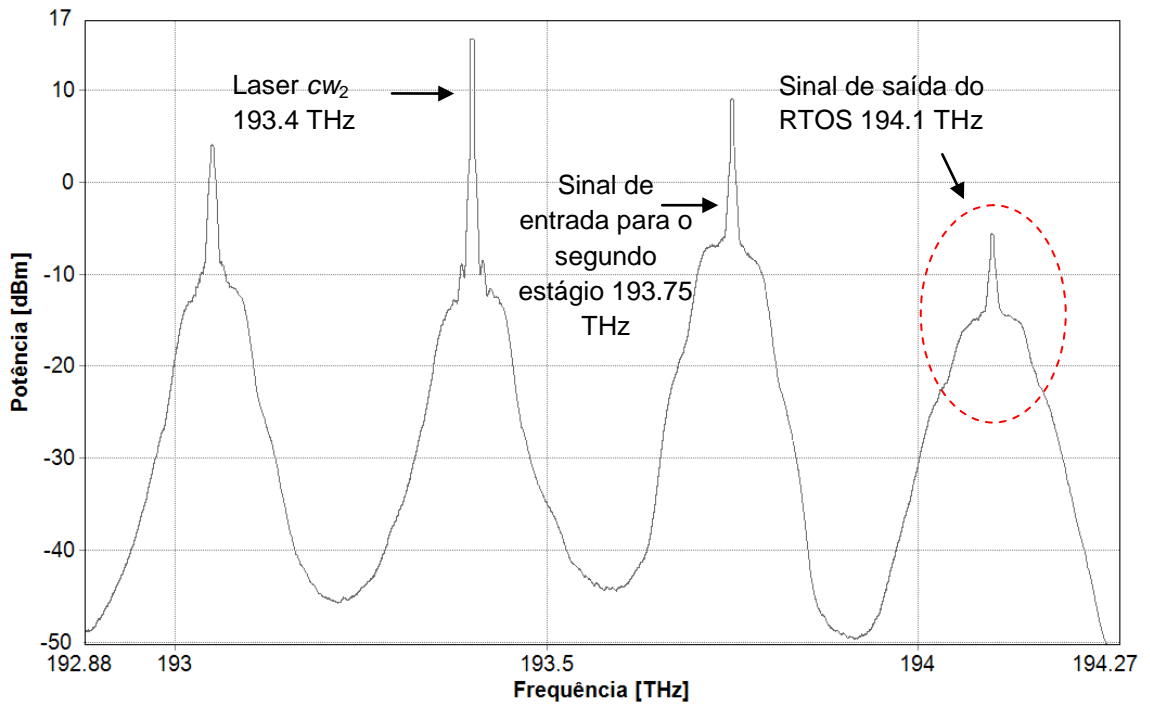


Figura 5.1.4: Canal 41, espectro após propagação na fibra do segundo estágio.

A Figura 5.1.5 apresenta o diagrama de olho para o sinal de saída do segundo estágio do RTOS. Após os dois estágios de regeneração o sinal de saída teve BER estimada em  $3,0 \times 10^{-16}$ . Considerando-se o sinal de entrada de BER estimada de  $1,2 \times 10^{-7}$ , houve uma regeneração total de nove ordens de grandeza.

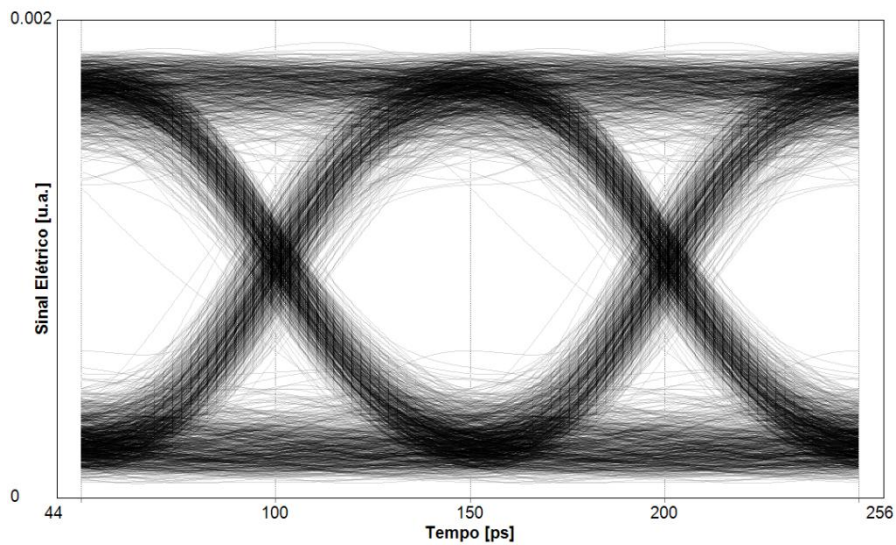


Figura 5.1.5: Canal 41 na saída do RTOS com BER estimada de  $3,0 \times 10^{-16}$ .

A regeneração obtida pelo RTOS para o canal 41 é melhor explicada analisando-se as funções de transferência resultantes dos dois estágios do RTOS. A Figura 5.1.6 apresenta a função de transferência estática do primeiro estágio, obtida com os parâmetros otimizados para o canal 41. Observa-se que houve convergência dos bits uns para valores mais definidos de amplitude, o que indica que houve compressão do ruído para bits uns. Entretanto, para bits zeros houve maior variação de amplitude no sinal de saída do primeiro estágio, não havendo compressão de ruído dos bits zeros. Este aspecto explica-se pela curva de transferência que começa crescente para bits de nível baixo e apresenta saturação a partir de certa amplitude para bits de nível alto.

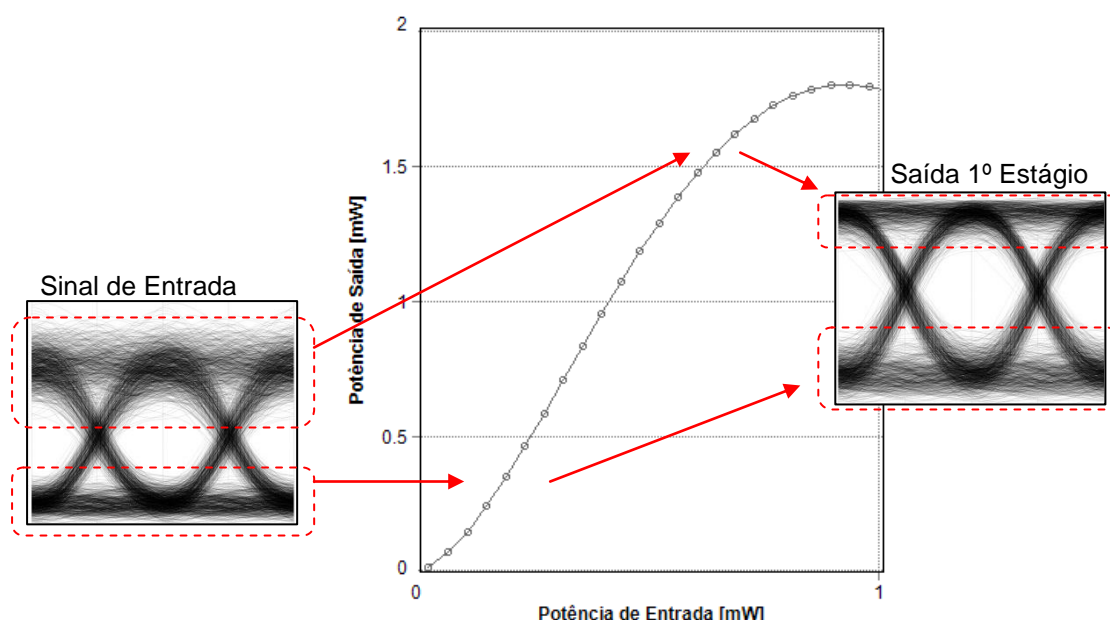


Figura 5.1.6: Canal 41, função de transferência do primeiro estágio.

A Figura 5.1.7 apresenta a função de transferência estática do segundo estágio, obtida com os parâmetros otimizados para o canal 41. Neste caso, acontece uma convergência mais acentuada dos bits zeros para níveis mais baixos de amplitude, resultando em compressão do ruído para bits zeros. Para os bits uns não há grande mudança no diagrama de olho de saída do segundo estágio em relação ao do primeiro. Assim, pôde-se constatar que há uma somatória construtiva das funções de transferência dos dois estágios que contribui para a regeneração obtida para o canal 41 com o RTOS. Com o intuito de apresentar esta somatória de regeneração, a Figura 5.1.8 apresenta a função de transferência estática de todo o RTOS, apresentando a potência de entrada do primeiro estágio no eixo x e a potência de saída do segundo estágio do RTOS no

eixo y. Nota-se que a função de transferência total apresenta curva bem caracterizada como tipo S.

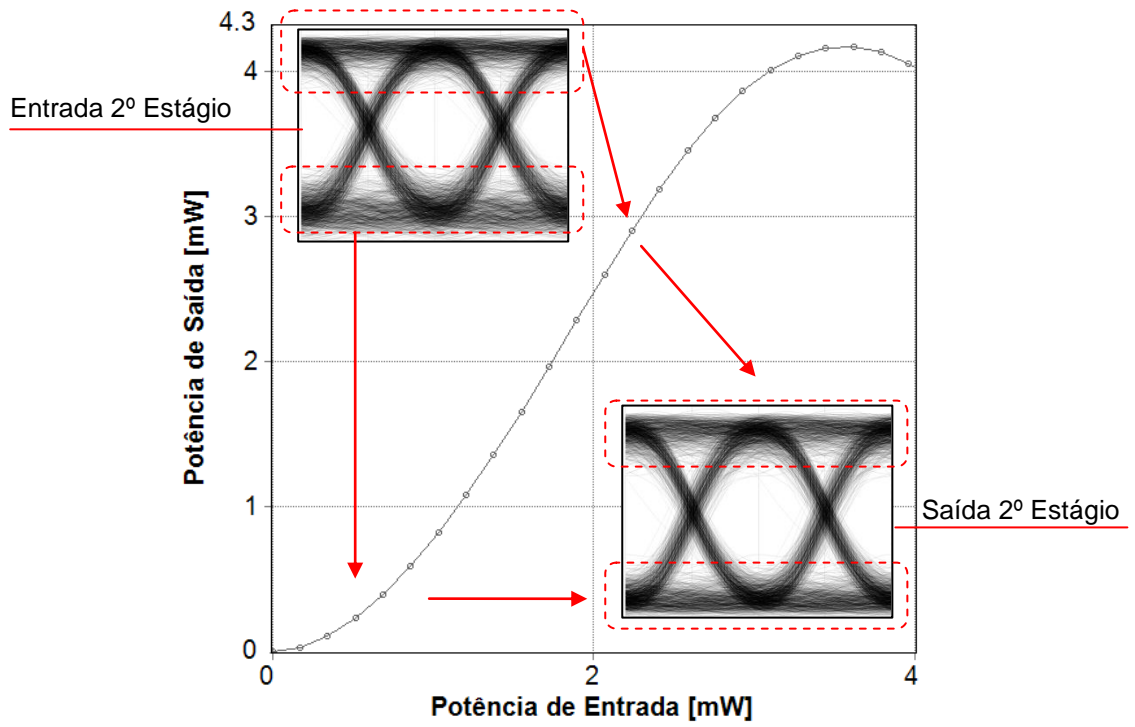


Figura 5.1.7: Canal 41, função de transferência do segundo estágio.

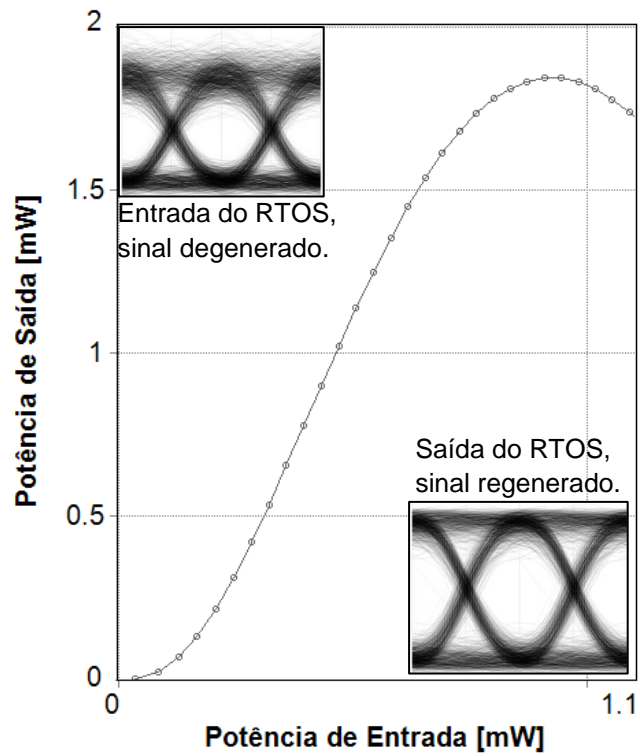


Figura 5.1.8: Canal 41, função de transferência total do RTOS.

## 5.2 Segunda Etapa de Simulações

Com os parâmetros da fibra altamente-não-linear dos dois estágios do RTOS definidos na primeira etapa de simulações, foram realizadas novas varreduras para regenerar sinais de outros comprimentos de onda sem alterar tais parâmetros. Nesta segunda etapa de simulações as varreduras foram restritas a parâmetros que podem ser alterados sem alteração de componentes do RTOS. A Tabela 5.2.1 apresenta os valores mínimos e máximos dos parâmetros utilizados nas varreduras da segunda etapa de simulações.

	<i>Parâmetro</i>	<i>Valor Mínimo</i>	<i>Valor Máximo</i>
Primeiro Estágio	$G_1$ (dB)	10	20
	$fcw_1$ (THz)	191	197
	$P_{cw_1}$ (mW)	0,1	100
Segundo Estágio	$G_2$ (dB)	0	25
	$fcw_2$ (THz)	191	197
	$P_{cw_2}$ (mW)	0,1	100

Tabela 5.2.1: Parâmetros variados na segunda etapa de simulações.

Serviram como sinais de entrada para o RTOS com parâmetros fixos definidos, canais ITU-T para sistemas DWDM com taxa de 10 Gb/s, modulação NRZ-OOK e com BER estimada de entrada da ordem de  $10^{-7}$ , seguindo o mesmo padrão adotado para o canal 41 utilizado na primeira etapa de simulações. Tais canais são apresentados pela tabela 5.2.2, bem como os parâmetros sintonizáveis para os quais se obteve melhor regeneração. Comercialmente tal como acontece com o canal 41, os canais são numerados de acordo com os Algarismos ao redor da vírgula quando a frequência do canal é escrita em THz. Desta forma a frequência de 192,0 THz é denominada canal 20, 192.1 THz é denominada canal 21 e assim sucessivamente até 196,0 THz denominada canal 60. Na segunda etapa de simulações, escolheu-se um canal a cada cinco canais da grade de 100 GHz para sistemas DWDM, começando com o canal 20, com exceção dos canais vizinhos ao canal 41 que também foram utilizados. A tabela 5.2.2 apresenta cada canal através desta nomenclatura comercial.



		Canais da grade ITU-T para sistemas DWDM											
Parâmetro		20	25	30	35	40	41	42	45	50	55	60	
Primeiro Estágio	$G_1$ (dB)	16	17	15	19	18	18	17	17	16	18	16	
	$fcw_1$ (THz)	192,45	192,95	193,45	193,9	194,4	194,45	194,55	194,85	195,3	195,75	196,25	
	$P_{cw_1}$ (mW)	20,5	20,5	40	17,7	14,9	6,6	1	26	9,3	34,4	17,7	
Segundo Estágio	$G_2$ (dB)	3	0	2	0	3	10	21	7	12	15	6	
	$fcw_2$ (THz)	191,1	191,6	192,1	192,7	193,2	193,4	193,5	193,8	194,4	195	195,5	
	$P_{cw_2}$ (mW)	42,5	20,1	20,1	100	68	72,3	55,2	26,5	100	3,9	70,6	

Tabela 5.2.2: Parâmetros otimizados para regeneração de canais da banda C.

Os resultados da regeneração destes vários canais da banda C são apresentados pelo Gráfico 5.2.1. O eixo x apresenta os canais que foram utilizados como entrada para o RTOS, enquanto o eixo y apresenta a BER estimada para cada canal na entrada, saída do 1º estágio e saída do RTOS.

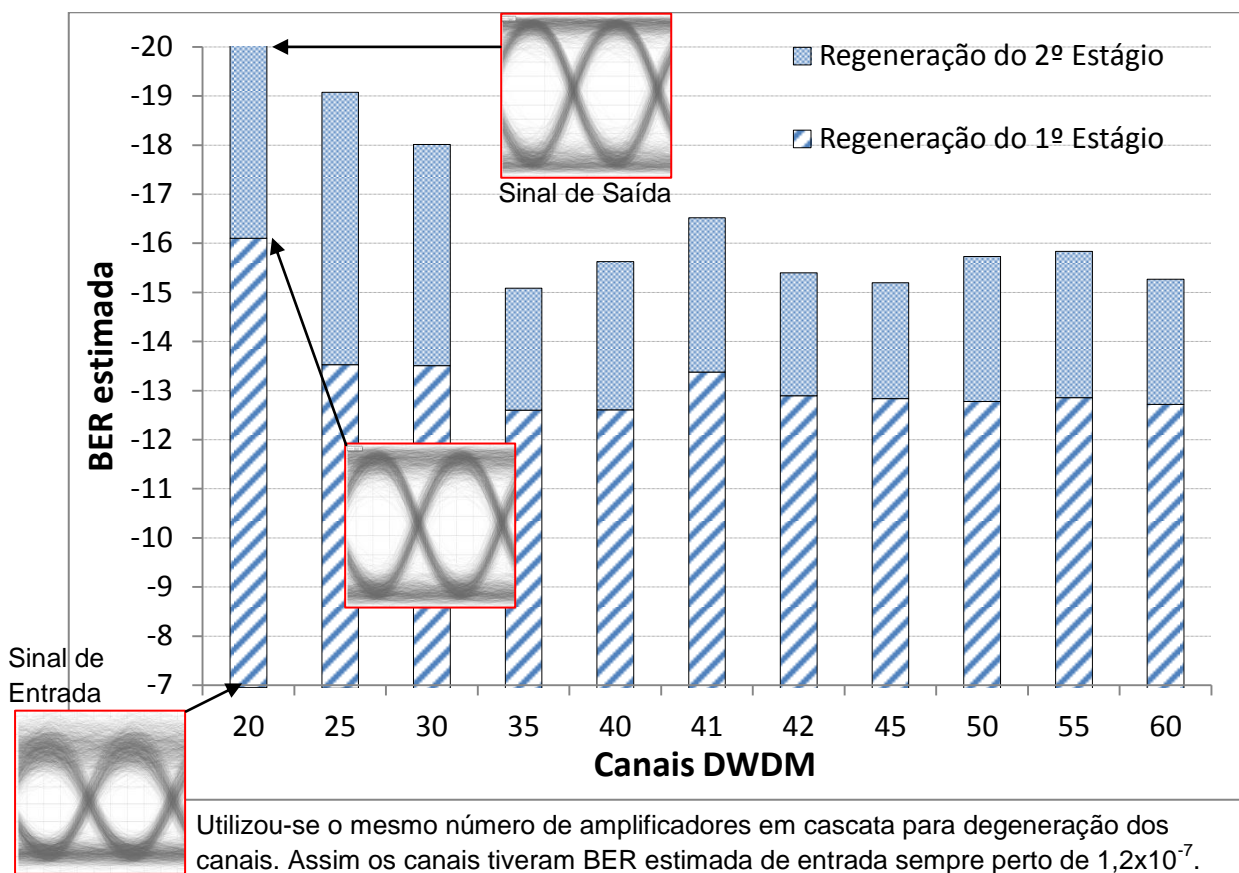


Gráfico 5.2.1: Resultados da regeneração diferentes canais da banda C.

As barras do Gráfico 5.2.1 representam a regeneração obtida no primeiro e segundo estágios do RTOS. Nota-se que o primeiro estágio foi o que promoveu maior regeneração para os canais, ao passo que o segundo estágio assume a função principal de converter novamente o canal para sua frequência original.

Sendo que o FWM dependente da dispersão do meio, e cada canal sofre dispersão diferente na fibra, os resultados do RTOS sugerem que é possível regenerar canais ópticos em três situações distintas. A primeira quando a frequência de referência  $f_0$  está à esquerda do sinal, a segunda quando  $f_0$  está entre o sinal e o laser  $cw$ , e a terceira quando está à direita do sinal. Para a fibra do primeiro estágio, a frequência  $f_0$  é 193,2 THz, então escolheu-se para apresentar os diagramas de olho os canais 20, 30 e 60, contemplando assim as três situações previstas para a localização de  $f_0$ .

O espectro dos canais 20, 30 e 60, após a propagação pela fibra do primeiro estágio, são apresentados pelas Figuras 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3 respectivamente. Nas figuras está indicada também a localização de  $f_0$ .

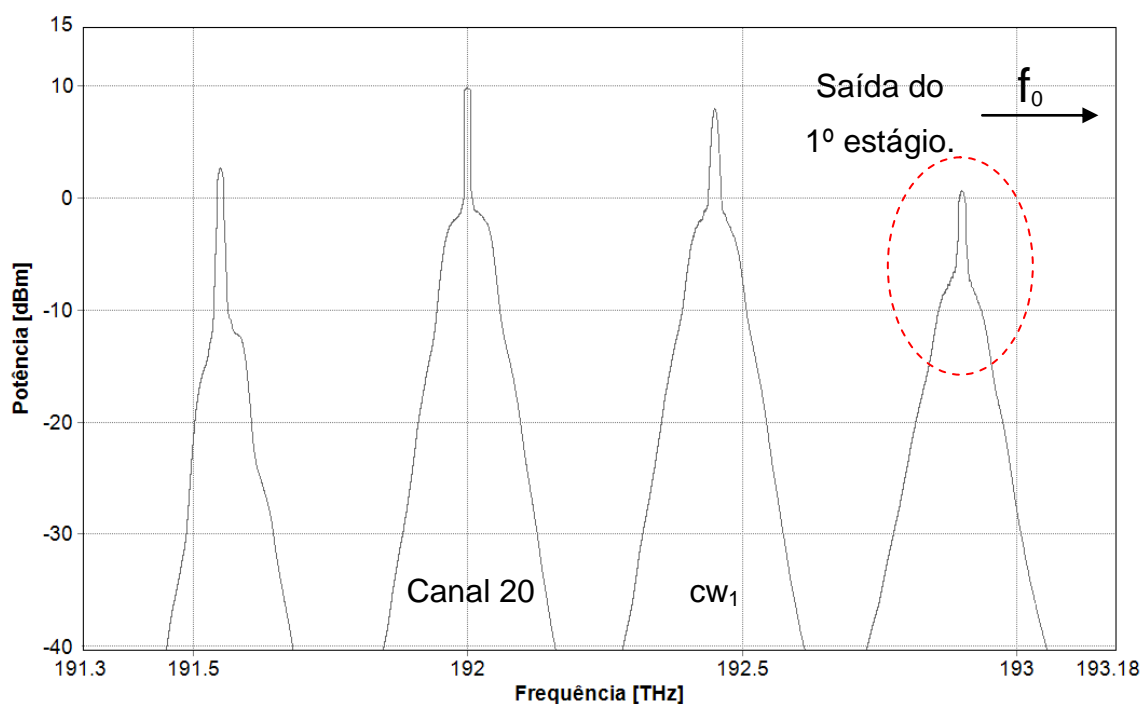


Figura 5.2.1: Espectro do canal 20 após fibra do 1º estágio.

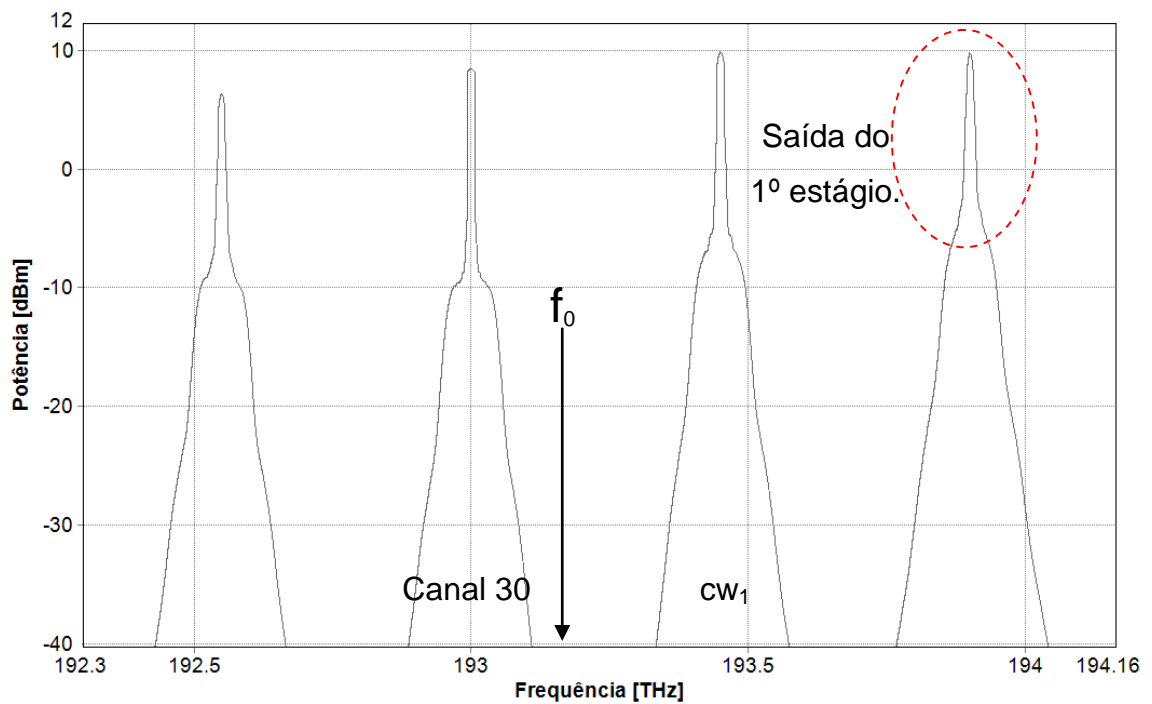


Figura 5.2.2: Espectro do canal 30 após fibra do 1º estágio.

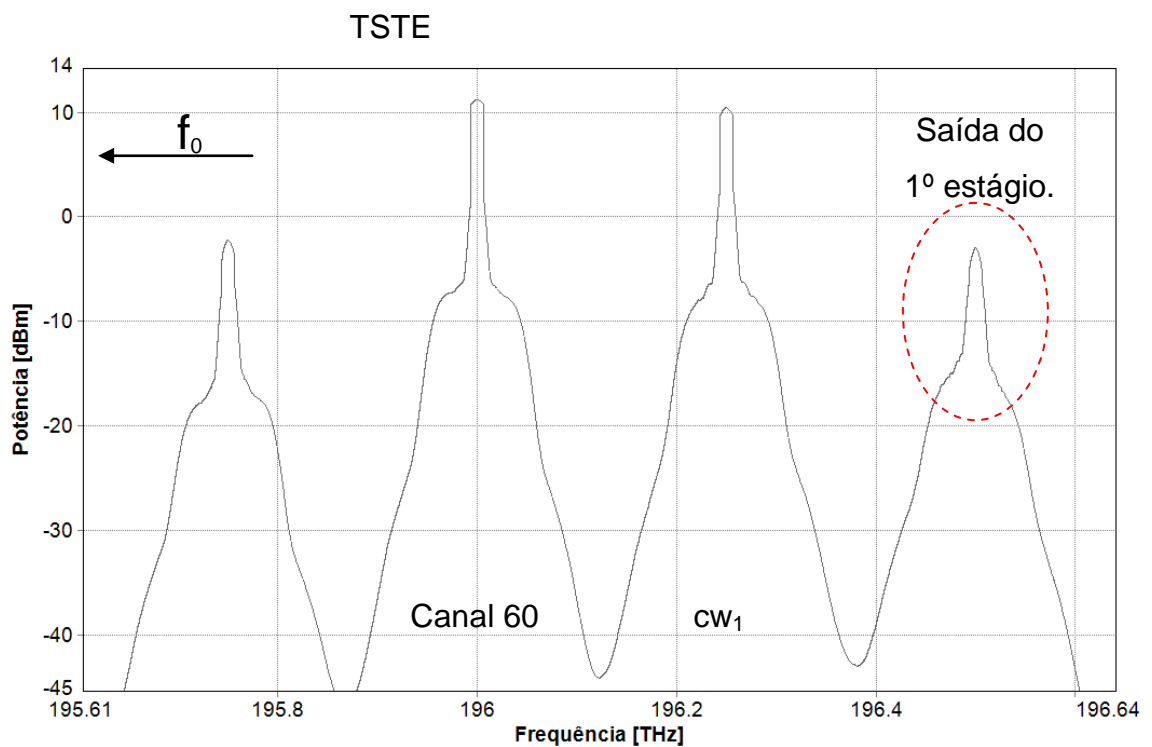


Figura 5.2.3: Espectro do canal 60 após fibra do 1º estágio.

Os diagramas de olho na entrada, saída do primeiro e saída do RTOS para os canais 20,30 e 60 são apresentados na Figura 5.2.4, mostrando a evolução da regeneração destes canais.

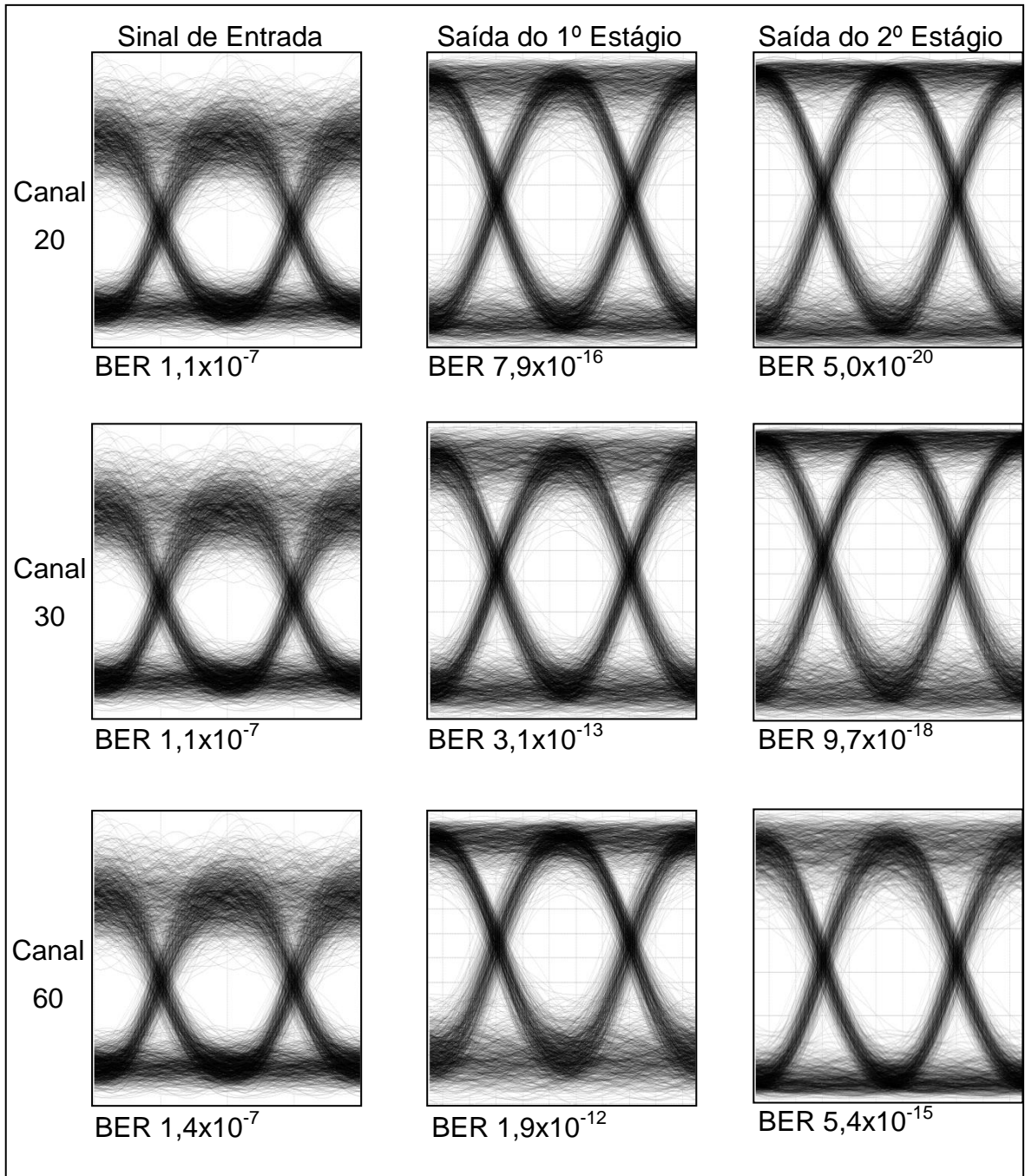


Figura 5.2.4: Diagramas de olho para os canais 20,30 e 60.

## 6 Conclusão

---

---

As simulações, realizadas durante a investigação do dispositivo proposto neste estudo, mostraram que o mesmo foi capaz de regenerar canais ópticos de 10 Gb/s com modulação NRZ-OOK cumprindo todos os requisitos definidos para este projeto. O RTOS projetado com dois estágios foi capaz de regenerar canais de maneira totalmente óptica mantendo o comprimento de onda original de cada canal. Pôde-se ainda regenerar canais diferentes mantendo os parâmetros fixos dos componentes utilizados e calibrando o RTOS somente utilizando parâmetros configuráveis que não fazem necessário alterar componentes utilizados. Tais resultados sugerem que o RTOS pode ser sintonizável. A banda de regeneração do RTOS mostrou-se bastante larga, compreendendo toda a banda C utilizada para sistemas ópticos. Foram testados no total, onze canais diferentes desde 192,20 THz até 196,0 THz. Para sinais de entrada de BER estimada menor que  $10^{-7}$  os sinais de saída puderam ser considerados livre de erros, pois sempre apresentaram BER estimada de saída de pelo menos  $10^{-15}$ .

Para dar continuidade a este estudo, os resultados alcançados sugerem que o dispositivo proposto pode ser construído experimentalmente e possivelmente se tornar um dispositivo comercial. Pode-se ainda modificar o sinal de entrada utilizando taxas mais elevadas e modulações mais complexas, uma vez que os princípios estudados podem ser aproveitados em novas investigações.

Outra possível linha de continuidade para este estudo seria a otimização do custo para a produção do RTOS. Algo que poderia ser investigado diminuindo-se a potência dos lasers empregados ou mesmo reduzindo componentes. Para esta última alternativa, o parâmetros utilizados para os canais 25 e 35 (ver tabela 5.2.2) deram indícios de que o amplificador do segundo estágio poderia ser dispensado, uma vez que não foi necessário ganho de acoplamento no segundo estágio para regeneração destes canais. Então, se poderia tentar eliminar o amplificador do segundo estágio RTOS, em detrimento de uma regeneração menos eficiente para os outros canais, mas em favor de um dispositivo mais barato.

## 7 Referências

---

---

- Agrawal, G. P. (2002). *Fiber-Optic Communications Systems, Third Edition*. New York: John Wiley & Sons.
- Borne, D. v. (2008). *Robust Optical Transmission Systems*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven Press.
- CIVCOM. (2013). *Products Overview*. Acesso em 10 de fevereiro de 2013, disponível em [http://www.civcom.com/Product\\_Overview.asp](http://www.civcom.com/Product_Overview.asp)
- Claudio Porzi, A. B. (15 de janeiro de 2013). Regenerative Wavelength Conversion of DPSK Signals Through FWM in an SOA. *PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, p. 4.
- E. A. M. Fagotto, M. L. (2011). Wavelength-Shift-Free All-Optical 2R Regeneration via Four-Wave Mixing. *WU1 (Contributed Oral)*, p. 3.
- E. A. M. Fagotto, U. R. (Junho de 2013). Design of Four-Wave Mixing Frequency-Shift-Free Amplitude Regenerators. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, p. 11.
- Francesca Parmigiani, L. P. (2012). Progress in Multichannel All-Optical Regeneration Based on Fiber Technology. *JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS*, p. 11.
- G. Sacchi, S. S. (Março de 2005). Design and Experimental Characterization of EDFA-Based WDM Ring Networks With Free ASE Light Recirculation and Link Control for Network Survivability. *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 23*, p. 9.
- G.694.1. (2012). *ITU-T Recommendations*. Acesso em 21 de março de 2013, disponível em <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/>
- Huawei. (2013). *Transport Network*. Acesso em 20 de março de 2013, disponível em <http://www.huawei.com/br/products/transport-network/index.htm>
- Hurdeman, A. A. (2003). *The Worldwide History of Telecommunications*. New York: John Wiley & Sons.
- Kartalopoulos, S. V. (2001). *DWDM Networks, Devices and Technology*. Piscataway: IEEE Press.
- Laude, J.-P. (2002). *DWDM Fundamentals, Components, and Applications*. Norwood: ARTECH HOUSE.

- Maeda, Y. (2009). *Optical Fibres, Cables and Systems*. Switzerland: ITU-T Manual.
- Masayuki Matsumoto. (março de 2012). Fiber-Based All-Optical Signal Regeneration. *JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS*, p. 16.
- NORI SHIBATA, R. P. (7 de Julho de 1987). Phase-Mismatch Dependence of Efficiency of Wave Generation Through Four-Wave Mixing in a Single-Mode Optical Fibe. *JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS*, p. 6.
- Padtec. (2012). *Produtos*. Acesso em 13 de dezembro de 2012, disponível em [http://www.padtec.com.br/produtos/backbone\\_optico.php](http://www.padtec.com.br/produtos/backbone_optico.php)
- Padtec. (2013). *Manual Técnico de Produtos da Plataforma LighrPad i1600G*. Campinas.
- Ramaswami, R. (2002). *Optical Networks a Pratical Perspective*. San Francisco: Morgan Kaufmann.
- VPIphotonics. (s.d.). Acesso em 12 de janeiro de 2013, disponível em <http://www.vpiphotonics.com/>
- Xiujun Lun, Y. H. (2003). All-optical Regeneration in WDM Networks. *ICCT* , p. 3.