



Universidade Federal do Pará

Centro Tecnológico

Departamento de Engenharia Elétrica e da Computação

Curso de Engenharia da Computação

Análise de Redes Ópticas WDM com Amplificadores
EDFA e Raman Utilizando o *Software Optisystem*

CLEIDE NIELLE SOUZA NEVES

Orientador:

PROF. JOÃO CRISÓSTOMO WEYL A. COSTA

Belém

2007.

Análise de Redes Ópticas WDM com Amplificadores EDFA e Raman Utilizando o *Software Optisystem*

CLEIDE NIELLE SOUZA NEVES

Orientador:

PROF. JOÃO CRISÓSTOMO WEYL A. COSTA

Trabalho submetido ao Colegiado do Curso de Engenharia da Computação para obtenção do grau de Engenheira da Computação.

Universidade Federal do Pará

Belém

2007

Análise de Redes Ópticas WDM com Amplificadores EDFA e Raman Utilizando o *Software Optisystem*

Cleide Nielle Souza Neves

Banca examinadora

.....
Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl A. Costa - Orientador

.....
Msc. Claudomiro de Souza de Sales Jr. - Co-orientador

.....
Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês - Membro

.....
Dr. João Cláudio Chamma Carvalho - Membro

Visto:

.....
Prof. Dr. Manoel Ribeiro Filho

Coordenador do Curso de Engenharia da Computação

À minha família,
que sempre me apoiou
e confiou no meu potencial.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por tudo que me proporcionou nesta caminhada, em busca desta conquista.

Ao meu pai, Sérgio Neves, pelo apoio e amor incondicional, pelo exemplo de vida e pelo eterno incentivo à minha educação, não medindo esforços para a realização dos meus sonhos.

À minha mãe, Maria da Glória, pelo amor e dedicação inestimáveis para minha formação pessoal. Obrigada pela vida, pelos ensinamentos, pelo conforto nos dias de cansaço e de tristeza.

À minha melhor amiga-irmã, Natália, sempre presente em minha vida ,pelo amor, apoio e companheirismo que sempre me proporcionou.

Aos professores do curso de Engenharia de Computação, por terem compartilhado com todos nós seus conhecimentos, contribuindo assim para nossa formação profissional.

Ao Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl A. Costa pelas orientações e principalmente pelo apoio para realizar este trabalho.

Ao Engº Gérson Serra pelas importantes informações fornecidas a respeito da rede óptica do Tramo-Oeste.

Ao Msc Claudomiro de Sales Jr. pela atenção e pelas sugestões que muito contribuíram para este trabalho.

Ao Clenilson, pela amizade e pelo apoio na realização do meu trabalho de conclusão de curso.

A todos os integrantes do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA) pelo companheirismo.

Aos meus amigos da "BP11"pela amizade durante estes cinco anos de caminhada.

Ao meu amigo tio Ton, pela sinceridade de uma amizade, aonde vimos que a distância não é suficiente para separar os amigos.

Ao meu GRANDE amigo tio Igor, pela amizade e incentivo durante esses cinco anos de curso. E pela ajuda no Latex.

À minha amiga tia, Cynthia, que me atura desde o Cefet, e sempre esteve do meu lado

quando precisei.

Ao meu amigo, Marcus Pantoja, que me ligava todo dia e mesmo longe não deixa de deixar nem que seja um recado no Orkut. Hum...

Ao meu amigo irmão, Marcus Guerra, pelo companheirismo e pelos conselhos.

Aos meus primeiros amigos, Plácido e Acácio, pela ajuda nas madrugadas de estudo.

As minhas amigas tias Lílían, Helen, Gabriela, Drika e Livika, pelo linda amizade.

Aos membros da banca examinadora pelo interesse mostrado no trabalho, e pela colaboração na revisão do texto.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho e para minha formação acadêmica.

Resumo

Nos últimos anos, a tecnologia de comunicações ópticas amadureceu, ao mesmo tempo e que as exigências de desempenho para as redes locais aumentaram de forma significativa. Enquanto os crescentes requisitos de largura de banda levaram a um aumento do custo dos sistemas metálicos, o desenvolvimento tecnológico possibilitou uma relativa redução do custo dos sistemas ópticos. Essas mudanças motivaram o desenvolvimento de novas tecnologias capazes de satisfazer estas necessidades de maior banda passante.

Nesse contexto, as redes ópticas WDM oferecem uma combinação importante: a possibilidade de aumentar a capacidade de comunicação diminuindo, ao mesmo tempo, o custo de transmissão por canal. Para projetar, analisar e implementar esses sistemas de comunicação, principalmente quando estes sistemas são caros e complexos, as ferramentas de simulação tornam-se indispensáveis.

O objetivo deste trabalho é analisar, através do software Optisystem 5.0TM da empresa Optiwave Systems Inc, a implementação de uma rede, com multiplexação por divisão do comprimento de onda (WDM) e com amplificação óptica, no enlace do Tramo-Oeste pertencente à Eletronorte. Neste trabalho também é feita uma comparação do desempenho e custo-benefício desta rede WDM utilizando amplificadores EDFA e Raman.

Sumário

Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vi
Glossário	vii
1 Introdução	1
2 Sistema de Comunicações Ópticas	3
2.1 Transmissores Ópticos	3
2.2 Fibras Ópticas	4
2.2.1 Vantagens das Fibras Ópticas	6
2.2.2 Algumas Limitações no Emprego da Fibra Óptica	8
2.2.3 Limitações de Sistema de Comunicações Ópticas	9
2.3 Receptor Óptico	15
3 Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda - WDM	16
3.1 Rede WDM	16
3.1.1 Multiplexadores/Demultiplexadores por Comprimento de Onda	17
3.1.2 Composição de uma Rede WDM	19
3.1.3 Vantagens e Desvantagens	19
3.1.4 Tipos de Sistemas WDM	20
3.1.5 Análise de Desempenho em um Sistema WDM	21
4 Amplificadores Ópticos : EDFA e Raman	24
4.1 Amplificadores EDFA	25
4.1.1 Parâmetros fundamentais dos EDFAs	25
4.1.2 Aplicações e Configurações dos EDFAs	27
4.2 Amplificadores Raman	29
4.2.1 O Espalhamento Raman Estimulado	30

4.2.2	A amplificação Raman	30
4.2.3	Espectro do Ganho Raman	31
4.2.4	Amplificador Raman	32
5	Resultados de Simulações em um Sistema WDM	34
5.1	Ferramentas de Simulação	34
5.2	Simulações para o enlace óptico do Tramo-Oeste	36
5.2.1	Simulações para a Implantação de um Sistema WDM na Rede Atual da Eletronorte	39
5.2.2	Simulações com Quatro Canais no 1° Trecho do Enlace	41
5.2.3	Simulações com Quatro Canais no Enlace Completo	47
5.2.4	Simulações com Oito Canais no 1° Trecho do Enlace	52
5.2.5	Simulações com Oito Canais no Enlace Completo	60
	Conclusões Finais	68
	Referências	70

Lista de Figuras

2.1	Esquema básico de um sistema de comunicação óptica.	3
2.2	Fibra óptica.	5
2.3	Dimensões dos tipos de fibras ópticas.	6
2.4	Dispersão de Modo de Polarização - PMD.	13
2.5	Diagrama em bloco do receptor.	15
3.1	Representação de um sistema de multiplexação em comprimento de onda básico.	17
3.2	Exemplo de demultiplexador utilizando grades de Bragg.	19
3.3	Diagrama de olho simplificado.	23
4.1	Curva de ganho em função da potência do sinal para um EDFA.	27
4.2	Posicionamento do amplificador de potência em um enlace óptico.	27
4.3	Posicionamento do pré-amplificador em um enlace óptico.	28
4.4	Posicionamento do amplificador de linha em um enlace óptico	28
4.5	Configuração básica de um EDFA.	29
4.6	EDFA com bombeio contra-propagante	29
4.7	EDFA com bombeio bidirecional.	30
5.1	Interface gráfica de usuário do <i>Optisystem</i>	35
5.2	Biblioteca de componentes do <i>Optisystem</i>	36
5.3	Configuração dos amplificadores ópticos na rede. UHE : Usina hidrelétrica, SE-TUC : Subestação de Tucuruí, REP-PAC : Repetidora Pacajá, SE-ALT : Subestação de Altamira, SE-TRZ : Subestação da Transamazônica, SE-RUR : Subestação de Rurópolis, SDH : <i>Synchronous Digital Hierarchy</i> (Hierarquia digital síncrona), ADM : <i>Add-drop Multiplexing</i> (Multiplexação insere/deriva).	37
5.4	Informações sobre os dados que trafegam no sistema óptico.	38
5.5	Estrutura de Regeneração para melhorar a recepção.	39
5.6	Configuração 1 - Rede WDM com os 7 amplificadores EDFAs (sendo 1, 2, 4 e 6 amplificadores de potência e 3, 5 e 7 pré-amplificadores) e 3 regeneradores.	40

5.7	Layout do primeiro trecho utilizando o amplificador EDFA ideal.	41
5.8	Diagrama de olho dos quatro canais no final do 1º trecho (123.62 km) do Tramo-Oeste com amplificador EDFA.	42
5.9	Diagrama de olho dos quatro canais no final do 1º trecho (123.62 km) do Tramo-Oeste com amplificador EDFA.	43
5.10	Diagrama espectral dos quatro canais ópticos na saída do enlace do 1º trecho. (a) canais em meio ao ruído ASE, (b) canais sem o ruído ASE.	44
5.11	Diagrama de olho dos quatro canais no final do 1º trecho (123.62 km) do Tramo-Oeste com amplificador Raman.	45
5.12	Diagrama espectral dos quatro canais ópticos na saída na saída do enlace do 1º trecho. (a) canais em meio ao ruído ASE, (b) canais sem o ruído ASE.	46
5.13	Modelo EDFA simulado.	47
5.14	Diagrama de olho dos quatro canais no final do enlace (672 km) do Tramo-Oeste com amplificador EDFA.	48
5.15	Diagrama espectral dos quatro canais ópticos na saída na saída do enlace total. (a) sinal de bombeio (980 nm) e os quatro canais em meio ao ruído ASE , (b) canais sem o ruído ASE.	49
5.16	Diagrama de olho dos quatro canais no final do enlace (672 km) do Tramo-Oeste com amplificador Raman.	50
5.17	Diagrama espectral dos quatro canais ópticos na saída na saída do enlace. (a) canais em meio ao ruído ASE, (b) canais sem o ruído ASE.	51
5.18	Diagrama de olho dos canais de 1 a 4 no final do 1º trecho (123.62 km) do Tramo-Oeste com amplificador EDFA.	52
5.19	Diagrama de olho dos canais de 5 a 8 no final do 1º trecho (123.62 km) do Tramo-Oeste com amplificador EDFA.	53
5.20	Diagrama espectral dos oito canais ópticos na saída na saída do enlace do 1º trecho. (a) canais em meio ao ruído ASE, (b) canais sem o ruído ASE.	55
5.21	Diagrama de olho dos canais de 1 a 4 no final do 1º trecho (123.62 km) do Tramo-Oeste com amplificador Raman.	56
5.22	Diagrama de olho dos canais de 5 a 8 no final do 1º trecho (123.62 km) do Tramo-Oeste com amplificador Raman.	57
5.23	Diagrama espectral dos quatro canais ópticos na saída na saída do enlace do 1º trecho. (a) canais em meio ao ruído ASE, (b) canais sem o ruído ASE.	59
5.24	Diagrama de olho dos canais de 1 a 4 no final do enlace (672 km) do Tramo-Oeste com amplificador EDFA.	60

5.25	Diagrama de olho dos canais de 5 a 8 no final do enlace (672 km) do Tramo-Oeste com amplificador EDFA.	61
5.26	Diagrama espectral dos oito canais ópticos na saída do enlace. (a) sinal de bombeio (980 nm) e os oito canais em meio ao ruído ASE, (b) canais sem o ruído ASE.	63
5.27	Diagrama de olho dos canais de 1 a 4 no final de todo o enlace (672 km) do Tramo-Oeste com amplificador Raman.	64
5.28	Diagrama de olho dos canais de 5 a 8 no final de todo o enlace (672 km) do Tramo-Oeste com amplificador Raman.	65
5.29	Diagrama espectral dos quatro canais ópticos na saída do 1º trecho. (a) sinal de bombeio (980 nm) e os oito canais em meio ao ruído ASE, (b) oito canais sem o ruído ASE.	67

Lista de Tabelas

2.1	Quadro comparativo entre as características típicas do LED e do diodo laser. .	4
5.1	Fator Q dos quatro canais após enlace com 123,62 km de fibra com amplificador EDFA ideal.	43
5.2	Fator Q dos quatro canais após enlace de 123,62 km de fibra com amplificador Raman.	46
5.3	Fator Q e BER dos quatro canais após enlace de 672 km de fibra com amplificador EDFA.	49
5.4	Fator Q e BER dos quatro canais após enlace de 672 km de fibra com amplificador EDFA.	51
5.5	Fator Q dos oito canais após enlace de 123,62 km de fibra com amplificador EDFA.	54
5.6	Fator Q dos oito canais após enlace com 123,62 km de fibra com amplificador Raman.	58
5.7	Fator Q e BER dos oito canais após enlace com 672 km de fibra com amplificador Raman.	62
5.8	Fator Q e BER dos oito canais após enlace de 672 km de fibra com amplificador Raman.	66

Glossário

ATM	-	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
BER	-	<i>Bit Error Rate</i>
CWDM	-	<i>Coarse Wave Division Multiplex</i>
DGD	-	<i>Differential Group Delay</i>
DSF	-	<i>Dispersion Shift Fiber</i>
DWDM	-	<i>Dense Wave Division Multiplex</i>
EDFA	-	<i>Erbium Doped Fiber Amplifiers</i>
ELN	-	<i>Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A - Eletronorte</i>
ESCON	-	<i>Enterprise System Connection</i>
FICON	-	<i>Fiber Connection</i>
FWM	-	<i>Four Wave Mixing - FWM</i>
GVD	-	<i>Group Velocity Dispersion</i>
IP	-	<i>Internet Protocol</i>
LED	-	<i>Light Emitting Diode</i>
LWP	-	<i>Low Water Peak</i>
MMF	-	<i>Multi Mode Fiber</i>
OPGW	-	<i>Optical Ground Wire</i>
PDH	-	<i>Plesiochronous Digital Hierarchy</i>
PMD	-	<i>Polarization Mode Dispersion</i>
RMS	-	<i>Root Mean Square</i>
SBS	-	<i>Stimulated Brillouin Scattering</i>
SDH	-	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SMF	-	<i>Single Mode Fiber</i>
SPM	-	<i>Self-Phase Modulation</i>
SRS	-	<i>Stimulated Raman Scattering</i>

UDWDM	-	<i>Ultra Dense Wave Division Multiplex</i>
WDM	-	<i>Wavelength Domain Mutiplexer</i>
XPM	-	<i>Cross-Phase Modulation</i>

Capítulo 1

Introdução

Nas últimas décadas, a disponibilidade de dados no formato eletrônico e o aparecimento de computadores pessoais a preços aceitáveis impulsionaram o crescimento da Internet, devido ao aumento do tráfego de dados, motivando a necessidade de crescimento da capacidade dos sistemas de telecomunicações. Neste contexto, os sistemas de comunicação ópticos têm desempenhado um papel fundamental, constituindo atualmente o núcleo central das redes dos grandes operadores mundiais de telecomunicações, principalmente no que se diz respeito a altas taxas de transmissão de dados [1].

Dentro das comunicações ópticas o surgimento dos amplificadores ópticos causou um grande impacto, pois este dispositivo viabilizou o uso da multiplexação por comprimento de onda (*Wavelength Domain Multiplexer* - WDM) o que por sua vez possibilita cada vez mais o aumento na capacidade de transmissão dos sistemas [2].

O desenvolvimento dos amplificadores ópticos é sem dúvida um dos pontos chave nas comunicações ópticas. Dentre os diversos tipos de amplificação óptica, destacam-se os amplificadores de fibra dopada com Érbio (*Erbium Doped Fiber Amplifiers* - EDFA) e a amplificação Raman. Os mais comuns são os que têm fibra dopada com érbio, usados em sistemas que operam em $1550nm$ de comprimento de onda.

A amplificação Raman é conhecida há vários anos, porém, recentemente com o desenvolvimento da tecnologia de fabricação de LASERs de bombeio com potências suficientes e conseqüentemente uma redução significativa no preço destes dispositivos, torna-se viável a utilização da amplificação Raman em enlaces ópticos comerciais [2].

Este trabalho abordará o projeto da rede de comunicações ópticas das Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A - Eletronorte (ELN), com ênfase no dimensionamento de amplificadores ópticos EDFA e Raman. Serão avaliados os aspectos relacionados à qualidade do sinal recebido

e o custo de instalação desses sistemas amplificadores ao longo da rede óptica da ELN.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 2 serão descritas as características de um sistema de comunicação óptica, onde serão mostrados, de modo sucinto, os elementos mais importantes que constituem um sistema de comunicações ópticas. O capítulo 3 apresenta as características, configurações e topologias do sistema WDM. No capítulo 4 serão descritos o princípio de funcionamento dos amplificadores EDFA e também apresentará os conceitos e tipos básicos de amplificadores Raman, utilizados em redes ópticas. O capítulo 5 abordará sobre a importância das ferramentas de análise de desempenho de um sistema óptico, tratando sobre a ferramenta de simulação utilizada neste trabalho, que é o software comercial *Optisystem 5.0TM*, desenvolvido pela empresa canadense *Optiwave Systems Inc.*. Também serão apresentados os resultados de simulações, envolvendo o projeto de um sistema WDM com utilização de amplificadores EDFA e/ou Raman para a rede óptica do Tramo-Oeste, pertencente às Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A - Eletronorte. No capítulo 6 serão apresentadas as conclusões resultantes das simulações dos sistemas WDM sobre a rede do Tramo-Oeste, mostrando as vantagens e desvantagens do uso dos amplificadores, bem como as propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Sistema de Comunicações Ópticas

Sistemas de comunicações ópticas são sistemas em que as mensagens são convertidas em sinais luminosos e são transmitidas em fibras ópticas. As fibras plásticas podem operar na faixa de 650 nm, região de luz infravermelha. Para outras fibras a luz deverá ter frequências maiores que a luz visível, começando a partir de 850 nm. Por essa razão, dependendo da fibra há frequências em que a transmissão dos sinais é mais efetiva [3].

Um sistema de transmissão por fibras ópticas, de um modo geral, é constituído basicamente por um transmissor óptico, um receptor óptico e um cabo de fibra óptica, conforme ilustrado no esquema da Figura 2.1.

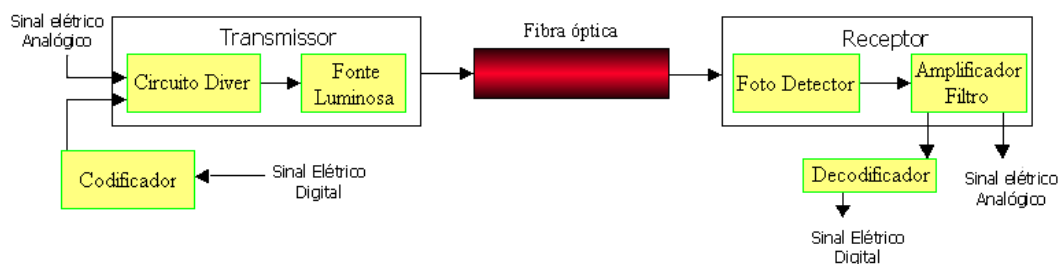


Figura 2.1: Esquema básico de um sistema de comunicação óptica.

Para a transmissão de sinais elétricos em uma fibra óptica, primeiro deve-se converter os sinais elétricos em sinais ópticos e depois re-converter os sinais ópticos em sinais elétricos.

2.1 Transmissores Ópticos

O transmissor óptico é composto de um dispositivo emissor de luz e o circuito driver associado. O dispositivo emissor de luz é o responsável pela conversão eletro-óptica dos sinais.

Nos sistemas de transmissão por fibras ópticas, dois dispositivos são comumente usados como fontes luminosas: diversos modelos de diodos emissores de luz (LED), baseados na emissão espontânea de fótons, e de diodos lasers, desenvolvidos a partir da emissão estimulada de irradiação. O circuito driver tem as funções de polarização elétrica e de comando da emissão de potência luminosa pelo dispositivo emissor de luz [4].

A capacidade de transmissão, assim como a potência emitida por um transmissor óptico, é função do tipo de dispositivo emissor de luz utilizado, sendo os com diodo laser geralmente superiores aos com LEDs, a custo de uma maior complexidade do transmissor [4].

Para se selecionar o tipo mais adequado de fonte de luz pode-se observar a Tabela 2.1, retirada de [5], que mostra uma comparação resumida entre o LED e o diodo laser.

Tabela 2.1: Quadro comparativo entre as características típicas do LED e do diodo laser.

Características comparadas	LED	Diodo laser
Tensão	1,5 V a 2,0 V	1,5 V a 2,0 V
Corrente de limiar	Não possui	10 mA a 200 mA
Potência óptica de saída	1 μ W a 200 μ W	500 μ W a 20 mW
Largura do espectro	Larga	Estreita
Tempo de subida	2 ns a 50 ns	0,1 ns a 1,0 ns
Resposta em frequência	5 MHz a 100 MHz	50 MHz a 2 GHz
Não-linearidade na modulação	Menor do que 5%	Entre 1% e 20%
Temperatura de trabalho	Entre 55°C e +150°C	Entre 55°C e +70°C
Complexidade de fabricação	Pequena	Grande
Complexidade de embalagem	Pequena	Grande
Custo	Pequeno	Grande
Eficiência	Menor do que 5%	Pode chegar a 30%

2.2 Fibras Ópticas

A fibra óptica corresponde ao meio onde a potência luminosa, injetada pelo emissor de luz, é guiada e transmitida até o fotodetector. Formada por um núcleo de material dielétrico (em geral, vidro) e por uma casca de material dielétrico (vidro ou plástico) com índice de

refração ligeiramente inferior ao do núcleo, a fibra óptica propaga a luz por reflexões sucessivas, conforme ilustrado na Figura 2.2. Esta estrutura básica da fibra óptica, na prática, é envolta por encapsulamentos plásticos de proteção mecânica, formando um cabo óptico que pode conter, uma ou mais fibras [6].

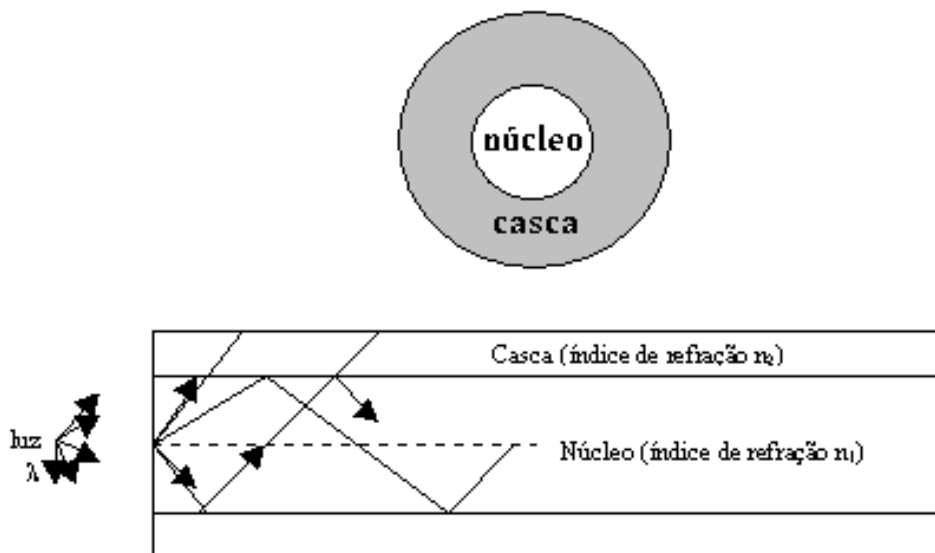


Figura 2.2: Fibra óptica.

A banda passante de uma fibra óptica é função, além do seu comprimento, da sua geometria e do seu perfil de índices de refração. As características de propagação dependem não só da lei de variação do índice de refração do núcleo, mas também da quantidade de modos guiados. Por esta razão, é necessário definir tipos de fibras ópticas de acordo com o número de modos que se propagam pelo núcleo. Nestas categorias, encontram-se as fibras multimodos (MMF) e as fibras monomodos (SMF).

A fibra multimodo foi o primeiro tipo a ser comercializada. Ela tem o núcleo muito maior do que a fibra monomodo, permitindo centenas de raios (ou modos) de luz através da fibra simultaneamente [7].

A fibra monomodo, por outro lado, tem um núcleo bem pequeno o que permite que somente um modo de luz por vez se propague através do núcleo. Para que mais informações fossem transmitidas, essas fibras foram projetadas para manter a integridade de cada sinal óptico em longas distâncias. Sua tremenda capacidade de transportar a informação com baixa perda intrínseca faz com que a fibra monomodo seja o meio ideal para muitas aplicações [7]. A Figura 2.3 ilustra as dimensões dos tipos de fibra.

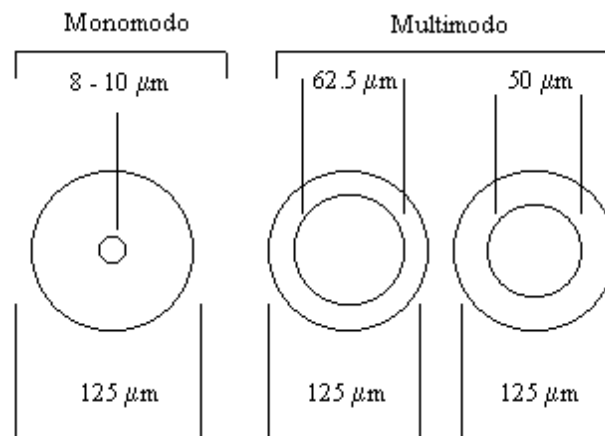


Figura 2.3: Dimensões dos tipos de fibras ópticas.

2.2.1 Vantagens das Fibras Ópticas

Em relação aos suportes físicos de transmissão convencionais, tais como o par metálico e o cabo coaxial, as fibras ópticas possuem características vantajosas, tais como:

- *Perdas de transmissão muito baixas:*

As fibras ópticas apresentam atualmente perdas de transmissão extremamente baixas, desde atenuações típicas da ordem de 3 a 5 dB/km na região em torno de $0,85 \mu\text{m}$ até perdas inferiores a 0,2 dB/km para a operação na região de $1,55 \mu\text{m}$ [6];

- *Imunidade a interferências e ao ruído:*

Por ser um meio isolante, não é possível a indução de correntes na fibra óptica por sinais elétricos que estiverem próximos a ela. Interferências causadas por descargas elétricas atmosféricas, pela ignição de motores, pelo chaveamento de relés e por diversas outras fontes de ruído elétrico esbarram na blindagem natural provida pelas fibras ópticas. Por outro lado, existe um excelente confinamento do sinal luminoso propagado pelas fibras ópticas. Desse modo, não irradiando externamente, as fibras ópticas agrupadas em cabos ópticos não interferem opticamente umas nas outras, resultando num nível de ruído de diafonia (*crosstalk*) desprezível [6]. Esta propriedade permitiu o desenvolvimento de cabos especiais de fibras ópticas que acompanham as linhas de transmissão de energia elétrica de alta tensão, compartilhando das mesmas instalações. Um desses sistemas é o denominado OPGW (*Optical Ground Wire*), formado por fibras ópticas no interior de um cabo pára-raios, utilizado nas linhas de transmissão de energia elétrica [7];

- *Isolação elétrica:*

Por ser constituída de vidro altamente transparente para os comprimentos de onda de interesse em comunicações ópticas, com elevadíssima resistência elétrica, as fibras ópticas não necessitam ser aterradas nem protegidas contra descargas elétricas. Além da segurança no manuseio durante a instalação, na manutenção e na operação, a fibra é capaz de suportar diferenças de potencial muito altas sem riscos para o sistema, para o operador ou para o usuário [7];

- *Pequeno tamanho e peso:*

As fibras ópticas têm dimensões comparáveis com as de um fio de cabelo humano. Mesmo considerando-se os encapsulamentos de proteção, o diâmetro e o peso dos cabos ópticos são bastante inferiores aos dos equivalentes cabos metálicos [6]. Isto resulta em vantagens como peso muito reduzido, maior flexibilidade mecânica, menor espaço para instalação, menor custo de transporte e armazenagem, etc., mesmo em cabos contendo grande números de pares de fibras ópticas;

- *Segurança da informação e do sistema:*

Em condições normais, as fibras ópticas não irradiam significativamente a luz propagada, implicando um alto grau de segurança para a informação transportada. Qualquer tentativa de captação de mensagens ao longo de uma fibra óptica é facilmente detectada, pois exige o desvio de uma porção considerável de potência luminosa transmitida [6]. Uma das conseqüências dessa vantagem é a garantia de um sigilo quase absoluto para a informação transmitida, sendo um fator considerável para comunicações militares, transmissão de dados entre bancos e quaisquer outras aplicações em que o sigilo seja importante;

- *Flexibilidade na expansão da capacidade dos sistemas:*

Para aumentar o tráfego de dados nas redes de comunicações ópticas, não é necessária a instalação de um novo cabo óptico, bastando apenas melhorar o desempenho dos transceptores, seja, por exemplo, substituindo-se LEDs por diodos laser ou utilizando-se técnicas de modulação superiores. A capacidade do sistema óptico pode ser aumentada ainda mais com a técnica de multiplexação em comprimento de onda (conhecida como WDM de “*Wavelength Division Multiplexing*”);

- *Custos potencialmente baixos:*

Ao contrário dos cabos de cobre, onde seu valor comercial é alto, os cabos de fibra óptica não são alvos de furto, pois a fibra óptica é construída a partir da sílica (SiO_2) um dos

materiais mais abundantes da Terra. Tem-se, por conseguinte, uma garantia contra eventual escassez de matéria-prima, o que poderia elevar o custo final do sistema;

- *Alta resistência a agentes químicos e variações de temperatura:*

As fibras ópticas, por serem compostas basicamente de vidro ou plástico, têm uma boa tolerância a temperaturas, favorecendo sua utilização em diversas aplicações. Além disso, as fibras ópticas são menos vulneráveis à ação de líquidos e gases corrosivos, contribuindo assim para uma maior confiabilidade e vida útil dos sistemas [6].

2.2.2 Algumas Limitações no Emprego da Fibra Óptica

Embora as vantagens das fibras ópticas superem suas desvantagens, alguns efeitos indesejáveis devem ser conhecidos, a fim de que possa orientar adequadamente a sua utilização. Alguns dos principais efeitos estão relacionados em seguida:

- *Fragilidade das fibras ópticas sem encapsulamentos:*

O manuseio de uma fibra óptica “nua” é bem mais delicado que no caso dos suportes metálicos.

- *Dificuldade de conexão das fibras ópticas:*

As pequenas dimensões das fibras ópticas exigem procedimentos e dispositivos de alta precisão na realização das conexões e junções;

- *Acopladores tipo T com perdas muito altas:*

É muito difícil se obter acopladores de derivação tipo T para fibras ópticas com baixo nível de perdas. Isso repercute desfavoravelmente, por exemplo, na utilização de fibras ópticas em sistemas multiponto;

- *Impossibilidade de alimentação remota de repetidores:*

Os sistemas com fibras ópticas requerem alimentação elétrica independente para cada repetidor, não sendo possível a alimentação remota através do próprio meio de transmissão;

- *Falta de padronização dos componentes ópticos:*

A relativa imaturidade e o contínuo avanço tecnológico não tem facilitado o estabelecimento de padrões para os componentes de sistemas de transmissão por fibras ópticas;

- *Custo elevado para sistemas de pequenas larguras de faixa:*

A redução no custo de um sistema óptico só é sentida quando puderem ser aproveitadas sua elevada capacidade de transmissão e pequena atenuação. Isto é, ao empregar uma fibra de baixa atenuação e grande largura de banda em um sistema de pequena distância e baixa capacidade, o seu custo pode ser superior aos que empregam cabos de cobre.

Estes inconvenientes não têm atrapalhado o uso dos sistemas ópticos, o que se comprova com a gigantesca expansão da rede óptica nos últimos vinte anos e um crescimento quase sem limites previstos para as próximas décadas [7].

2.2.3 Limitações de Sistema de Comunicações Ópticas

Uma fibra óptica tem características de transmissão descritas essencialmente pelas suas propriedades quanto à atenuação e à dispersão dos sinais por ela transmitidos. Essas duas propriedades foram os dois primeiros fatores limitativos da capacidade dos sistemas.

A atenuação é definida como a perda de potência do enlace, uma característica fundamental em todo tipo de suporte de transmissão. O fenômeno da dispersão, por sua vez, é uma característica de transmissão que exprime o alargamento dos pulsos transmitidos. Este alargamento determina a largura de banda da fibra óptica (em *Hertz*), e está relacionada com a capacidade de transmissão de informação das fibras (em bits por segundo).

Atenuação

A atenuação experimentada pelos sinais luminosos propagados através de uma fibra óptica é uma característica cujo papel é fundamental na determinação da distância máxima (alcance) entre um transmissor e um receptor óptico, sendo uma das mais importantes propriedades das fibras ópticas para o projeto de sistemas de comunicação [6].

A atenuação quantifica a perda de energia do sinal óptico durante a propagação. Se P_{in} , for a potência óptica à entrada de uma fibra de comprimento L , à saída temos P_{out} , em que

$$P_{out} = P_{in} \exp^{-\alpha L} \quad (2.1)$$

onde α é a constante de atenuação. Pela expressão 2.1 podemos verificar que o decaimento da potência óptica segue uma lei exponencial. É usual as perdas da fibra serem quantificadas em dB/km [1].

Os mecanismos básicos que provocam a atenuação do sinal óptico são a absorção, difusão e radiação. Nas fibras, o campo óptico estende-se desde o núcleo até o revestimento, sendo as perdas uma média das perdas verificadas em cada uma das camadas da fibra.

É importante observar que no dimensionamento de um sistema de transmissão, além das perdas introduzidas pela atenuação da fibra óptica, devem ser consideradas também as perdas causadas nas emendas e conexões entre segmentos de fibras e no acoplamento das fibras com as fontes e detectores luminosos.

Os valores característicos de atenuação variam principalmente em função dos comprimentos de onda. Existem faixas de comprimento de onda onde a perda é menor, essas faixas são de especial interesse comercial e conhecidas como janelas de transmissão, centradas nos comprimentos de onda de 850 nm, 1300 nm e 1550 nm. A atenuação tem um valor mínimo em torno dos 1550 nm, tornando esta região uma das mais atrativas para as comunicações ópticas.

As perdas por absorção são causadas pelos seguintes tipos de mecanismos: a absorção intrínseca, a absorção extrínseca e a absorção por defeitos estruturais.

A absorção intrínseca é uma característica do material utilizado, neste caso a sílica. A absorção extrínseca é devida à presença de impurezas na fibra. A absorção por defeitos estruturais, como o próprio nome indica, deve-se a irregularidade na estrutura atômica da fibra [1].

Em condições normais, a absorção devido a irregularidade na estrutura atômica da fibra é desprezável, comparativamente à absorção total. No entanto, pode ser significativa se a fibra estiver exposta a fortes radiações, que levem a alterações na sua estrutura atômica [1].

Dispersão

A palavra dispersão é associada ao fato de que os diversos modos de propagação são transmitidos através da fibra óptica com velocidades diferentes, atingindo a extremidade de chegada em intervalos de tempo também distintos. Como consequência, o sinal óptico sofre um alargamento temporal em relação ao sinal emitido no início da fibra [7].

Existem três mecanismos básicos da dispersão em fibras ópticas com implicações distintas segundo o tipo de fibra :

- Dispersão modal ou intermodal;
- Dispersão material;
- Dispersão de guia de onda.

A dispersão modal ou intermodal caracteriza-se por afetar a transmissão em fibras multimodo, sendo provocada pelos caminhos possíveis de propagação (modos) que a luz pode ter no núcleo.

Em fibras monomodo, a dispersão resulta do somatório de duas componentes, a dispersão material e a dispersão do guia de onda, correspondente à chamada dispersão cromática ou intramodal.

O fator mais relevante quando se analisam sistemas que utilizam fibras ópticas em taxas de transmissão altas é o efeito da dispersão cromática. A dispersão cromática é causada pela diferença na velocidade de propagação das componentes espectrais do pulso óptico, provocando alargamento do mesmo.

Para um enlace de fibra óptica do tipo monomodo de comprimento L , o tempo total (T) para que um pulso luminoso a uma frequência ω percorra toda a fibra é dado por

$$T = L/v_g \quad (2.2)$$

onde v_g é a velocidade de grupo do sinal luminoso que percorre a fibra monomodo e é definido por [8]

$$v_g = (\partial\beta/\partial\omega)^{-1} = c/n_g \quad (2.3)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo que é igual a 3×10^8 m/s, n_g é o índice de refração de grupo e β é a constante de propagação da fibra que é dada por

$$\beta = n\omega/c \quad (2.4)$$

O índice de refração de grupo, n_g , é dado por

$$n_g = n + \partial n/\partial\omega \quad (2.5)$$

O índice de refração n é caracterizado pelas frequências de ressonância que dependem da oscilação dos elétrons [6].

O coeficiente de dispersão D de uma fibra óptica é, por definição, o alargamento dado em unidades de ps de um pulso óptico, com uma largura de banda igual a 1 nm e propagando-se em um enlace de 1 km de distância. O valor típico de D pode ser definido por [9]

$$D = \frac{\partial}{\partial \lambda} \cdot \frac{1}{v_g} = \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right) \approx -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (2.6)$$

onde:

D - Coeficiente de dispersão cromática, expresso em $ps/(km \cdot nm)$;

λ - Comprimento de onda do sinal transmitido;

v_g - Velocidade de grupo;

β - Constante de propagação;

c - Velocidade da luz no vácuo;

$\beta_2 = \partial^2 \beta / \partial \omega^2$.

A tolerância à dispersão é inversamente proporcional ao quadrado da taxa de bits (B) e linearmente com a distância do enlace. O comprimento máximo do enlace limitado por dispersão é dado por [10]

$$L_D \leq \frac{K}{|D| B_2} \quad (2.7)$$

onde D é o coeficiente de dispersão em $ps/(nm \cdot km)$ de transmissão da fibra, B é a taxa de dados em Gb/s e K é uma constante que depende de detalhes do transmissor e receptor, formatos de modulação e penalidade permitida.

Por isso, as propriedades dispersivas determinam o limite da capacidade de informação da fibra.

A dispersão cromática pode ser compensada ou combatida, através de várias técnicas, sendo a mais comum, a utilização de fibras com dispersão deslocada (*Dispersion Shift Fiber* - DSF). DSF é uma fibra dopada com impurezas que têm características de dispersão negativa [11].

PMD

Os mais relevantes efeitos de perdas que ocorrem em sistemas WDM são: a atenuação, a dispersão (*Group Velocity Dispersion* - GVD) e os efeitos não-lineares. Quando a taxa de transmissão aumenta para 10 Gb/s existem outros efeitos que passam a ser importantes e implicam no aumento das perdas do sistema. É o caso da dispersão do modo de polarização (*Polarization Mode Dispersion* - PMD). Para taxas iguais ou superiores a 10 Gb/s a GVD e a PMD passam a comprometer o funcionamento do sistema e exigem que técnicas de gerenciamento de dispersão sejam consideradas.

A PMD é um importante parâmetro que limita a extensão de enlaces de comunicação óptica de longa distância. Em uma fibra óptica cilindricamente perfeita existem dois modos degenerados que se propagam em direções perpendiculares. Quando a geometria se afasta da simetria cilíndrica quebrando essa degenerescência, os dois modos passam a se propagar com velocidades de grupo diferentes ao longo dos eixos ortogonais, gerando o fenômeno de atraso diferencial de grupo (DGD - *Differential Group Delay*).

Além desses fatores, a existência de microcurvaturas, torções, mudanças de temperatura etc, que estão distribuídas randomicamente ao longo da fibra, provocam o acoplamento de potência entre esses dois modos resultando em uma variação aleatória do DGD [12]. A Figura 2.4 ilustra os efeitos que resultam na PMD.

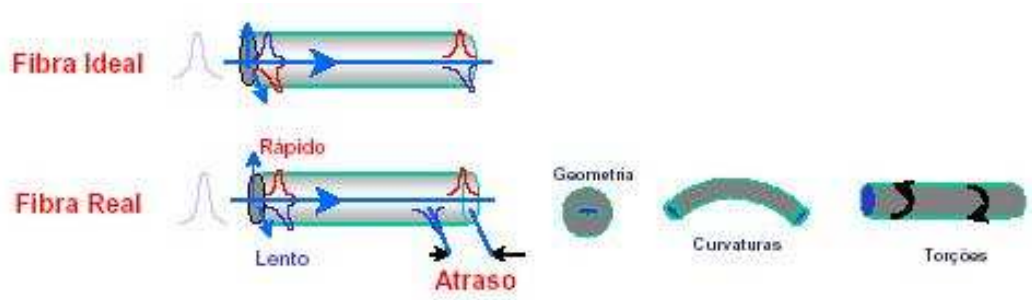


Figura 2.4: Dispersão de Modo de Polarização - PMD.

De acordo com [1], a chamada dispersão devida à polarização dos modos de propagação é dada por

$$D_{PMD} = \frac{\Delta T}{L_T} = \left| \frac{1}{v_{gx}} - \frac{1}{v_{gy}} \right| \quad (2.8)$$

onde ΔT , é o atraso sofrido após a propagação de uma distância L_T , por um impulso que se propaga no eixo lento relativamente a um impulso que se propaga no eixo rápido. E v_{gx} e v_{gy}

são as velocidades de grupo dos dois modos de polarização ortogonal. A quantidade D_{PMD} , expressa pela equação 2.8 vem normalmente expressa em ps/km.

Um meio útil de caracterizar a PMD para grandes comprimentos de fibra é em termos do valor médio do atraso diferencial de grupo (DGD). Este pode ser calculado pela relação

$$\langle \Delta T_{pot} \rangle \approx D_{PMD} \sqrt{L} \quad (2.9)$$

onde D_{PMD} , o qual é medido em ps/\sqrt{km} , é o parâmetro PMD médio. Valores típicos de D_{PMD} estão na faixa de 0,1 a 1,0 ps/\sqrt{km} [9].

Propriedades Não-Lineares

A não linearidade da fibra óptica é o resultado da modulação do índice de refração causado por mudanças na intensidade óptica do sinal. Esses efeitos não lineares podem ser classificados em duas categorias:

- Efeitos originados pela não linearidade do índice de refração: modulação de fase (*Self-Phase Modulation* - SPM), modulação de fase cruzada (*Cross-Phase Modulation* - XPM) e mistura de quatro ondas (*Four Wave Mixing* - FWM) [9];
- Efeitos originados pela difusão estimulada, tais como o espalhamento Raman estimulado (*Stimulated Raman Scattering* - SRS) e o espalhamento de Brillouin estimulado (*Stimulated Brillouin Scattering* - SBS).

Os efeitos de não linearidade manifestam-se por uma variação da fase em função da potência óptica, e os de difusão estimulada originam ganhos e perdas ópticas dependentes da intensidade do campo [1].

2.3 Receptor Óptico

A detecção do sinal óptico, onde ocorre a conversão do sinal óptico em um sinal elétrico com a posterior interpretação da sequência de bits são funções realizadas no bloco receptor. Pode-se identificar no esquema simplificado da Figura 2.5 que este bloco é composto basicamente por um detector tipo PIN, responsável pela conversão do sinal modulado sobre a portadora óptica em um sinal elétrico e um filtro elétrico. O filtro elétrico passa-baixa do tipo Bessel garante a eliminação de boa parte do ruído gerado no PIN.

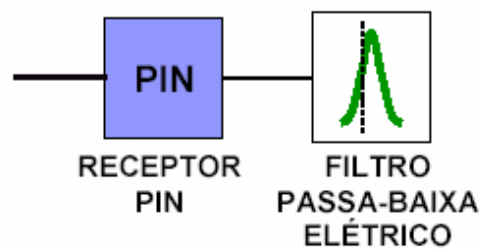


Figura 2.5: Diagrama em bloco do receptor.

Capítulo 3

Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda - WDM

3.1 Rede WDM

A rede WDM utiliza a tecnologia de multiplexação óptica para compartilhar a mesma fibra com diversos sinais ópticos de diferentes comprimentos de onda, que são usualmente denominados de canais com “cores” distintas. A taxa de transmissão de cada canal pode variar de 2 Mb/s (E1) até 10 Gb/s (STM-64), dependendo da aplicação, sendo que a sua maior utilização ocorre nos sistemas que necessitam taxas de transmissão acima 155 Mb/s (maior que STM-1) [13].

Sua elevada flexibilidade para transportar diferentes tipos de hierarquias digitais permite oferecer interfaces compatíveis com as diversas aplicações existentes, entre elas as redes de transmissão PDH e SDH, as redes multisserviços ATM, IP e *Frame Relay*, e aplicações específicas para redes de dados e de computadores de grande porte (*Fast Ethernet*, *Gbit Ethernet*, interfaces ESCON, FICON e Fiber-Channel, entre outras) [13].

A tecnologia das redes WDM permite ainda implementar mecanismos ópticos de proteção nos equipamentos ou diretamente nas redes da camada de aplicação, oferecendo serviços com alta disponibilidade e efetiva segurança no transporte de informações.

A Figura 3.1 mostra uma estrutura em blocos típica de um sistema WDM. Os sinais das fontes ópticas são combinados em um multiplexador (MUX) e transmitidos pela mesma fibra óptica. No lado do receptor, os feixes ópticos são separados conforme os comprimentos de onda por um desmultiplexador (DEMUX), que os encaminha aos respectivos detectores [7].

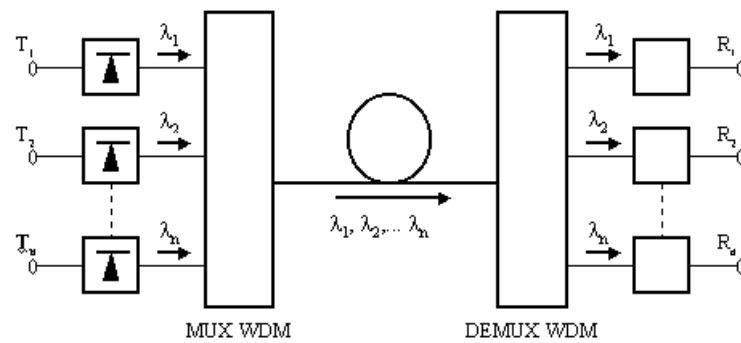


Figura 3.1: Representação de um sistema de multiplexação em comprimento de onda básico.

3.1.1 Multiplexadores/Demultiplexadores por Comprimento de Onda

Quando muitos comprimentos de onda são considerados, podem-se utilizar técnicas alternativas para multiplexação/demultiplexação baseadas na característica de dispersão angular de alguns elementos. Um exemplo é a utilização da grade de difração, que reflete a luz em direções específicas de acordo com a periodicidade, o ângulo no qual a luz incide na grade, e o comprimento de onda da luz incidente. Esses dispositivos serão abordados a seguir.

- *Grades*

O termo grade é utilizado para descrever quase todos os dispositivos cuja operação envolve interferência entre múltiplos sinais ópticos originados da mesma fonte, mas com deslocamentos relativos de fase diferentes. As grades são usadas há bastante tempo na óptica para separar a luz em seus comprimentos de onda constituintes. Nos sistemas de comunicação WDM, elas são utilizadas como demultiplexadores, filtros, dentre outros dispositivos.

Há vários tipos de grades, como, por exemplo: grades *Stimax*, grades de *Bragg* à fibra, grades à fibra de período longo. As grades *Stimax* têm sido utilizadas em sistemas de transmissão WDM disponíveis comercialmente. Entretanto, esse é um dispositivo volumoso que não facilita a fabricação e por isso se torna caro. Isso leva à utilização de outros tipos de grades que são fabricadas com maior facilidade além de apresentarem perdas menores [9].

Aqui, será falado apenas das grades baseadas em fibra (grades de *Bragg* e de período longo), pois são dispositivos atrativos para utilização em diversas aplicações, como filtros,

funções *add/drop*, e como compensadores de dispersão. Suas principais vantagens são sua baixa perda, facilidade de acoplamento (a outras fibras), ser insensível à polarização, baixo coeficiente de temperatura e encapsulamento simples, resultando em um dispositivo de baixo custo.

As grades são criadas nas fibras a partir da fotosensitividade de certos tipos de fibras ópticas. Por exemplo, uma fibra de sílica convencional dopada com germânio torna-se bastante fotosensitiva. A partir daí, se a fibra é exposta à luz ultravioleta (UV), haverá uma mudança no índice de refração dentro do núcleo da fibra. Se essa luz for resultado de dois feixes (UV) que, interferindo entre si, geram uma radiação que varia periodicamente, o índice de refração sofrerá uma variação que acompanha a variação do feixe: aumentado quando a intensidade do feixe aumenta e permanecendo inalterado quando a intensidade do feixe diminui. A mudança necessária no índice de refração para produzir grades em fibras é da ordem de 10^{-4} . Além dessa técnica, outras técnicas podem ser utilizadas para produzir grades em fibras.

- *Grades de Bragg baseadas em fibra*

São também chamadas de grades de período curto porque seu período é comparado ao comprimento de onda (cerca de $0,5 \mu\text{m}$). Podem ser fabricadas com perdas extremamente baixas (0,1 dB), alta precisão em comprimento de onda (consegue-se $\pm 0,05 \text{ nm}$ com facilidade), alta supressão de *crosstalk* para canais adjacentes (40 dB).

O coeficiente de temperatura de uma grade de *Bragg* relativa a fibra é tipicamente $1,25 \times 10^{-2} \text{ nm}/^\circ\text{C}$ devido à variação do comprimento da fibra com a temperatura. Porém, isso pode ser compensado utilizando-se um encapsulamento com coeficiente de expansão térmico negativo. Essas propriedades das grades de *Bragg* à fibra a tornam um dispositivo muito útil em aplicações sistêmicas.

A Figura 3.2 [9] mostra a utilização de grades de Bragg à fibra em um elemento *drop* óptico simples. Ele consiste de um circulador de três portas com uma grade de Bragg à fibra. O circulador transmite a luz que vem da porta 1 para a porta 2 e transmite a luz que vem da porta 2 para a porta 3. Neste caso, a grade reflete o comprimento de onda desejado, que é, então, levado à porta 3. Os comprimentos de onda restantes são transmitidos através da fibra.

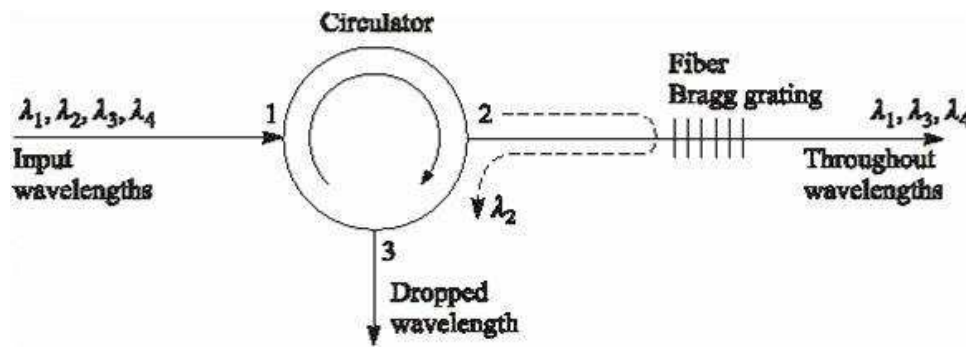


Figura 3.2: Exemplo de demultiplexador utilizando grades de Bragg.

- *Grades de período longo baseadas em fibra*

São chamadas assim porque seu período é muito maior que o do comprimento de onda, variando de uma poucas centenas de μm a uns poucos nm . São fabricadas da mesma maneira que as grades de Bragg e são utilizadas, hoje, principalmente, como filtros dentro de EDFAs para compensar o espectro do ganho que não é plano. Elas servem como eficientes filtros rejeita-banda, e podem ser adaptadas para fornecer uma equalização quase perfeita do espectro do ganho do EDFA.

Essas grades apresentam todas as atraentes propriedades das grades à fibra e podem se tornar largamente utilizadas em várias aplicações funcionando como filtros.

3.1.2 Composição de uma Rede WDM

Segundo [7], uma rede WDM é composta por:

- **Rede Física:** é o meio de transmissão que interliga os equipamentos WDM, composto pelos cabos de fibra óptica.
- **Equipamentos:** são os multiplexadores, "transponders", amplificadores e equipamentos de *cross connect* de diversas capacidades que executam o transporte de informações.
- **Sistema de Gerência:** é o sistema responsável pelo gerenciamento da rede WDM, contendo as funcionalidades de supervisão e controle da rede, e de configuração de equipamentos e provisionamento de facilidades.

3.1.3 Vantagens e Desvantagens

As redes WDM oferecem vários benefícios, quando comparada com outras tecnologias:

- Permite utilizar equipamentos de aplicação para redes de transporte e multisserviços sobre a mesma infra-estrutura de meio físico óptico;
- Permite o tráfego de qualquer tecnologia, independente do fabricante, através do uso de transponders;
- Permite a economia de equipamentos de aplicação ao longo das rotas, mediante a instalação destes apenas nos pontos de troca de tráfego;
- Permite a economia e até mesmo a otimização do uso de fibras ópticas em locais com alta densidade de redes e acessos;
- Permite o uso eficiente do espectro de frequência da fibra;
- Permite facilidade de gerenciamento das portadoras.

Entretanto, a tecnologia WDM apresenta ainda as seguintes desvantagens:

- Projeto, instalação e operação da rede WDM é complexo e deve ser feito com um planejamento criterioso e detalhado;
- Não existe padronização de equipamentos e da tecnologia WDM, que impede que sejam usados equipamentos de fabricantes distintos em um mesmo enlace da rede.

3.1.4 Tipos de Sistemas WDM

Os tipos de sistemas WDM mais comuns, de acordo com [13], são:

- CWDM (*Coarse Wave Division Multiplex*): sistema cuja multiplexação óptica possui espaçamento de 200 GHz e pode variar a quantidade de canais de 4 a 16 dependendo da fibra óptica adotada no projeto. Sua taxa de transmissão pode variar de E3 (34 Mbit/s) a STM-16 (2,5 Gbit/s). Possui um melhor desempenho com o uso da fibra óptica tipo LWP (*Low Water Peak*);
- DWDM (*Dense Wave Division Multiplex*): sistema cuja multiplexação óptica possui espaçamento que varia de 100 GHz a 25 GHz, e pode variar a quantidade de canais de 16 a 128. Sua taxa de transmissão pode variar de STM-1 (155 Mbits/s) a STM-64 (10 Gbits/s). Possui um melhor desempenho com o uso a fibra óptica tipo SMF (*Single Mode Fiber*);

- UDWDM (*Ultra Dense Wave Division Multiplex*): sistema cuja multiplexação óptica possui espaçamento menor que 25 GHz e possui uma quantidade de canais superior a 128. Este sistema atualmente encontra-se em desenvolvimento.

3.1.5 Análise de Desempenho em um Sistema WDM

A taxa de erro de bit e o diagrama de olho são duas grandezas utilizadas como figuras de mérito para avaliar o desempenho do sistema WDM.

Segundo [14], podemos avaliar o desempenho dos sistema de comunicação óptica através da monitoração da taxa de erro de bit, ou BER (*Bit Error Rate*), analisando os registros de erros durante um intervalo de tempo de transmissão do sinal. Este tipo de medição fornece um indicativo sobre a condição de operação do enlace. Porém, uma simples medição de BER não é suficiente para identificar o fenômeno que está causando a degradação do desempenho.

Por outro lado, por meio da análise do diagrama de olho, verifica-se a diferença de amplitude entre os níveis lógicos e a duração do bit. Dessa maneira pode-se constatar qual é o efeito predominante no sistema ou qual é o efeito que limita a qualidade do sistema.

Taxa de erro de bit (*Bit Error Rate*)

A expressão geral para determinar a taxa de erro de bit ou BER é dada pela quantidade de bits errados recebidos dividida pela quantidade de bits transmitidos.

A decodificação do sinal elétrico é feita acumulando-se amostras de corrente tomadas na saída do fotodetector no instante de decisão. O circuito de decisão verifica se o valor da amostra da corrente medida é superior ou inferior à corrente de decisão (I_D). Caso seja superior o circuito entende que o bit recebido é o bit “1” e ao contrário o bit é entendido como sendo “0”.

Devido à variação da potência do sinal óptico recebido e aos efeitos de ruído térmico e *shot*, a corrente de saída no fotodetector apresenta flutuação em torno dos valores da corrente do bit “0” e do bit “1”, I_0 e I_1 respectivamente. Ou seja, consideram-se os valores da corrente elétrica quando os bits recebidos são “0” e “1”, respectivamente.

A decodificação ou leitura errada de um bit “1” ocorre quando a oscilação da corrente no instante de decisão faz com que o valor da corrente seja inferior à I_D . O processo análogo pode ocorrer na decodificação errada do bit “0”.

Desse modo, a BER é calculada como a soma da probabilidade de um bit “1” ser interpretado como “0” ou como a probabilidade de um bit “0” ser interpretado como “1”, conforme

a expressão 3.1 [8]:

$$BER = p(1)p(0/1) + p(0)p(1/0) \quad (3.1)$$

onde,

$p(1)$ - Probabilidade de transmissão do bit "1";

$p(0)$ - Probabilidade de transmissão do bit "0";

$p(0/1)$ - Probabilidade do bit "1" ser decodificado como "0";

$p(1/0)$ - Probabilidade do bit "0" ser decodificado como "1";

Supondo uma distribuição uniforme entre "0"s e "1"s, pode-se simplificar a equação 3.1 por [8]:

$$BER = 1/2[p(0/1) + p(1/0)] \quad (3.2)$$

A SNR está relacionada a BER através da expressão 3.3 [9].

$$BER = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{x_2}{2}\right) dx \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q} \quad (3.3)$$

onde o símbolo Q tradicionalmente representa a SNR por simplicidade de notação. A aproximação no lado direito da equação 3.3 é válida para $BER < 10^{-3}$, sendo portanto válida para sistemas de comunicações ópticas [9].

O valor Q é definido pela equação 3.4 como:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (3.4)$$

onde I_1 e I_0 são os valores médios das correntes do sinal detectado para os bits 1 e 0 respectivamente, e σ_1 e σ_0 são os valores da raiz média quadrática (*root-mean square* - rms) dos ruídos detectados.

Alguns valores típicos do fator Q e o valor da BER correspondente são: $Q = 6$ para $BER = 10^{-9}$, $Q = 7$ para $BER = 10^{-12}$ e $Q = 8$ para $BER = 10^{-15}$.

Diagrama de Olho

A atenuação do sinal devido às perdas na fibra e a dispersão cromática causam o aumento na taxa de erro de bits. A medição da BER pode indicar a queda de desempenho no sistema, porém, não é eficiente para identificar a causa do problema.

Para a identificação da causa da alta taxa de erro de bits é necessário analisar a forma de onda do pulso elétrico na saída do fotodetector.

No entanto, a análise de uma grande sequência de bits em um osciloscópio comum ficaria comprometida por problemas de escala e resolução do medidor, ou a sequência de bits deve ser armazenada na memória do medidor e analisada por partes. Este processo levaria um tempo consideravelmente grande. Essa dificuldade pode ser contornada com a medida do diagrama do olho.

No diagrama do olho pode-se analisar uma sequência de bits de uma vez. A construção mais simples do diagrama consiste na divisão de um trem de pulso em várias partes de 3 bits de comprimento, por exemplo. Cada uma das partes é representada de forma sobreposta e simultânea. Dessa forma pode-se visualizar a forma de onda de todos os bits de uma sequência em um único diagrama. Todas as combinações possíveis de transição de estágio lógico dos bits estão representadas no diagrama de olho.

Através da medição do diagrama de olho, pode-se observar os valores médios e a oscilação de sinal nos níveis lógicos “0” e “1”. Uma grande oscilação de potência em torno do valor médio dos níveis lógicos pode causar uma detecção errada de bits, elevando a BER.

Outro fator importante é identificar o ponto de cruzamento (ou intersecção) do olho, que é composto pelo ponto referente ao tempo que ocorre a intersecção das curvas da transição positiva (do bit “0” para o bit “1”) e negativa (do bit “1” para o bit “0”), e pelo valor da amplitude onde ocorre o cruzamento (intersecção) da curva. Através da medição da distância entre 02 tempos de cruzamento, tem-se a largura do bit, parâmetro este que permite analisar o alargamento dos bits. A figura 3.3 ilustra um diagrama de olho simplificado.

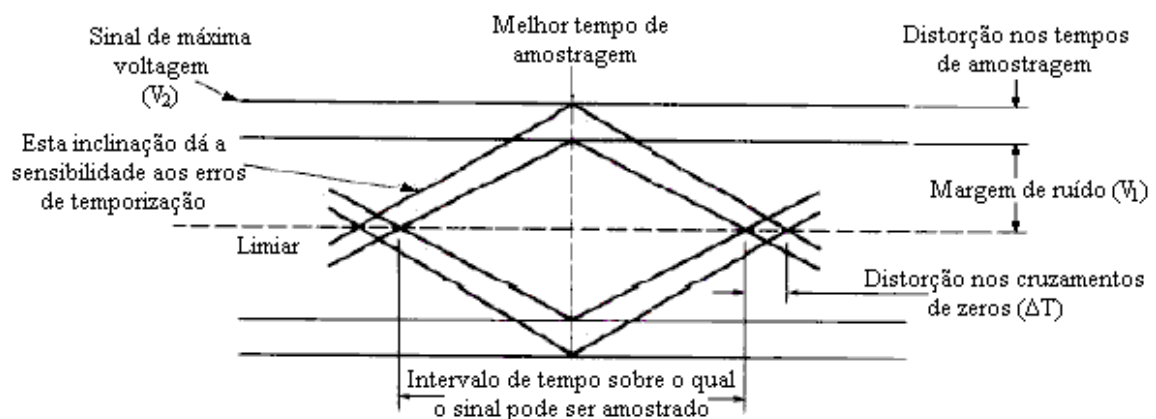


Figura 3.3: Diagrama de olho simplificado.

Capítulo 4

Amplificadores Ópticos : EDFA e Raman

A tecnologia WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), aumenta a capacidade de transmissão das fibras ópticas existentes através da transmissão dos dados em um comprimento de onda particular. O WDM vem a ser um modo de aumentar a largura de banda pela operação simultânea de mais de um comprimento de onda. Esta técnica é transparente à taxa de transmissão e ao tipo de tráfego usado na transmissão de cada canal [3], [15].

No início das comunicações ópticas, os regeneradores amplificadores de sinal elétricos eram os mais utilizados, ou seja, fotodetectores seguidos de amplificadores elétricos onde estes sinais eram tratados, passavam por um circuito de decisão, e novamente transformados em sinais ópticos e emitidos pela fibra. Porém era necessário um regenerador para tratar cada canal o que faz o custo deste tipo de sistema ser praticamente inviável economicamente, e extremamente espaçoso fisicamente. Foi nesse cenário que ocorreu o advento dos amplificadores ópticos, um dos grandes passos nas comunicações ópticas.

Diferentemente dos regeneradores, os amplificadores ópticos possuem uma grande largura de banda e são capazes de amplificar diversos canais ópticos simultaneamente, sem a necessidade de demultiplexação e conversão eletro-óptica, característica de fundamental importância para a consolidação dos sistemas WDM [16].

Os amplificadores mais utilizados até o momento são :

- Amplificadores Raman a fibra;
- Amplificadores ópticos de semicondutores;
- Amplificadores a fibra dopada (Érbio, Túlio e outros) EDFA e TDFA.;

- Amplificadores paramétricos;
- Amplificadores híbridos.

As características dos amplificadores serão detalhadas a seguir, através de um estudo comparativo entre dois deles: o amplificador EDFA e o amplificador RAMAN.

4.1 Amplificadores EDFA

O desenvolvimento da tecnologia WDM proporcionou um enorme crescimento na capacidade de transporte de informação dos sistemas de comunicações ópticas. Este crescimento foi em grande parte proporcionado pelo advento da amplificação óptica, mais precisamente pelo desenvolvimento dos amplificadores a fibra dopada com érbio (EDFAs - Erbium Doped Fiber Amplifiers) que são dispositivos capazes de amplificar múltiplos comprimentos de onda sem causar interferência entre eles, habilitando, desta maneira, a transmissão de vários comprimentos de onda na mesma fibra, e, conseqüentemente, proporcionando um grande aumento da capacidade de transmissão dos sistemas ópticos, já que possibilitaram o aumento da taxa de transmissão na mesma proporção do aumento do número de canais transmitidos na fibra [17].

A amplificação proporcionada pelos EDFAs opera em uma faixa de comprimento de onda em torno de 1550 nm, que coincide com a janela de comunicação onde a fibra apresenta as menores perdas. Além disto, a amplificação é feita de forma transparente à taxa de transmissão e ao formato de modulação, característica que possibilitou a transmissão simultânea de diversos serviços na rede óptica, além do fato de possibilitar atualizações no sistema óptico sem necessidade da troca do equipamento repetidor.

4.1.1 Parâmetros fundamentais dos EDFAs

O ganho, a figura de ruído e a potência de saída são os três parâmetros básicos de importância fundamental na caracterização dos EDFAs. A localização dos EDFAs ao longo dos enlaces de comunicação ópticas são determinados através dos valores destes parâmetros.

Ganho

O ganho é um parâmetro do EDFA que depende de uma série de características de operação do amplificador, tais como, concentração do dopante (Érbio) na fibra, comprimento

da fibra dopada, potência de entrada do sinal, potência de bombeio injetada, topologia, entre outras [18]. O cálculo do ganho de um amplificador óptico (em decibel, dB) é definido como 10 vezes o logaritmo da razão entre as potências do sinal na saída e na entrada do amplificador (em mW), equação 4.1 [19]:

$$G(db) = 10 * \log \left(\frac{PS(mW)}{PE(mW)} \right) \quad (4.1)$$

onde PS representa a potência do sinal na saída e PE a potência do sinal na entrada do amplificador.

Figura de ruído

A figura de ruído (NF- *noise figure*) indica, numericamente, a quantidade de ruído adicionada ao sinal pelo amplificador. No caso do EDFA, a figura de ruído leva em consideração a principal fonte de ruído introduzida pelo amplificador, que é a ASE (Amplified Spontaneous Emission). A figura de ruído é dada pela equação 4.2, onde SNRE é a relação sinal ruído na entrada e SNRS é a relação sinal ruído na saída do amplificador [19].

$$NF = 10 * \log \left(\frac{SNR_E}{SNR_S} \right) \quad (4.2)$$

Em muitos casos, o ruído ASE em um EDFA pode ser o fator limitante do desempenho de um enlace de comunicações ópticas. Dependendo do sistema, o próprio ruído ASE tende a saturar o amplificador, causando problemas na amplificação dos canais, a ponto de degradar a relação sinal ruído na saída do amplificador. Na prática, a figura de ruído dos EDFAs fica em torno de 4 a 8 dB [20], sendo que o valor ideal é de 3 dB [21]. O desempenho de sistemas de comunicações via fibras ópticas é corrompido devido a inserção de ruído, causada pelo amplificador, podendo até inviabilizar a transmissão.

Potência de Saída

A potência de saída de um amplificador é a potência amplificada, para uma determinada potência na entrada do amplificador. A potência de saída saturada, também é um outra definição importante, que corresponde à potência medida na saída do amplificador após uma queda de 3 dB (compressão de ganho) em relação ao ganho de pequeno sinal do amplificador. Observando-se a potência de saída para a qual o ganho cai 3 dB, podemos obter a potência de saída saturada de um EDFA a partir da curva de ganho em função da potência de saída. Na Figura 4.1, temos um exemplo de curva de ganho em função da potência de saída, onde a

potência de saída saturada é 12 dBm, enquanto que a potência de saída máxima é de 15 dBm [18].

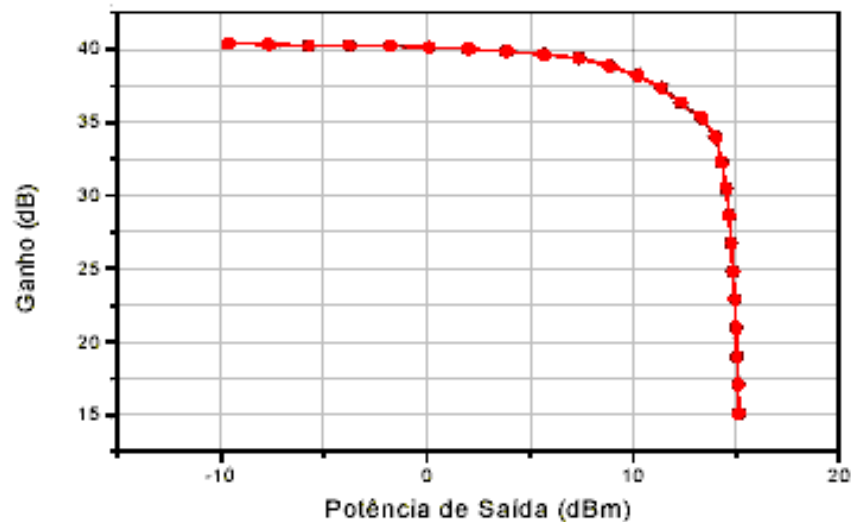


Figura 4.1: Curva de ganho em função da potência do sinal para um EDFA.

4.1.2 Aplicações e Configurações dos EDFAs

Amplificador de potência (*booster*), amplificador de linha e pré-amplificador são as três formas básicas de aplicação dos amplificadores ópticos, que diferem entre si pelas suas funções no sistema de comunicações ópticas e pela posição dos amplificadores em relação à linha de transmissão.

Amplificador de Potência

Os amplificadores de potência tem como função aumentar a potência do sinal de entrada da fibra e estão localizados na saída dos transmissores. São projetados para receber na sua entrada sinais de alta potência, aumentando a distância de transmissão [8],[9].

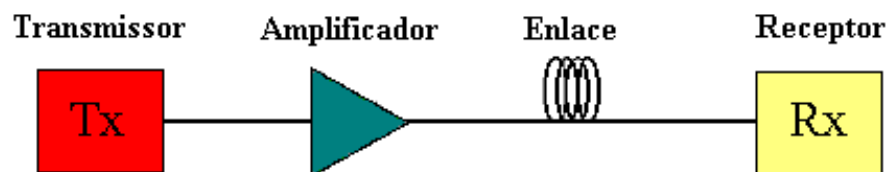


Figura 4.2: Posicionamento do amplificador de potência em um enlace óptico.

Pré-Amplificador

Os pré-amplificadores são posicionados pouco antes dos receptores ópticos de forma a aumentar a sensibilidade do receptor, graças à sua característica principal, a baixa inserção de ruído [8],[9].

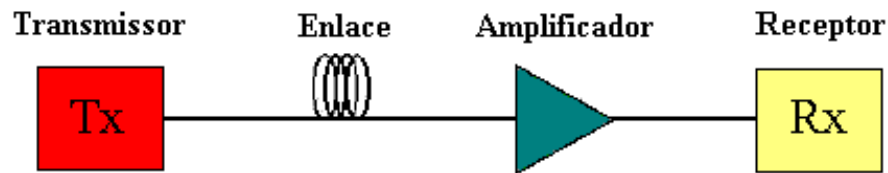


Figura 4.3: Posicionamento do pré-amplificador em um enlace óptico.

Amplificador de Linha

Os amplificadores de linha são posicionados ao longo da linha de transmissão para compensar a atenuação devido à propagação do sinal através da fibra óptica [8],[9].



Figura 4.4: Posicionamento do amplificador de linha em um enlace óptico

Configurações dos EDFAS

O posicionamento do *laser* de bombeio em relação ao sinal a ser amplificado diferencia algumas configurações de EDFA. Nelas, o bombeio pode ser co-propagante, contra-propagante ou bidirecional.

Os EDFAS comerciais utilizam como fontes de bombeio diodo *lasers* nos comprimentos de onda de 980 nm e 1480 nm.

A Figura 4.5 ilustra a configuração básica de um EDFA, também conhecida como configuração com bombeio co-propagante, uma vez que o sinal e o bombeio se propagam no mesmo sentido. Esta configuração é indicada para o caso de pré-amplificadores, pois apresenta uma baixa figura de ruído, podendo também ser utilizada como amplificador de linha [18].

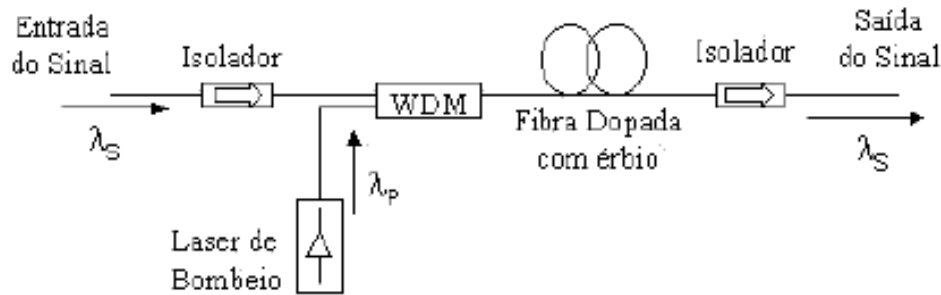


Figura 4.5: Configuração básica de um EDFA.

Na Figura 4.6 temos a configuração contra-propagante, onde o acoplador é localizado na saída da fibra dopada, com o bombeio se propagando no sentido contrário ao sinal. Esta configuração é indicada para utilização como amplificador de potência, pois devido à maior concentração de bombeio na saída da fibra dopada, a potência de saída do amplificador é maximizada [18].

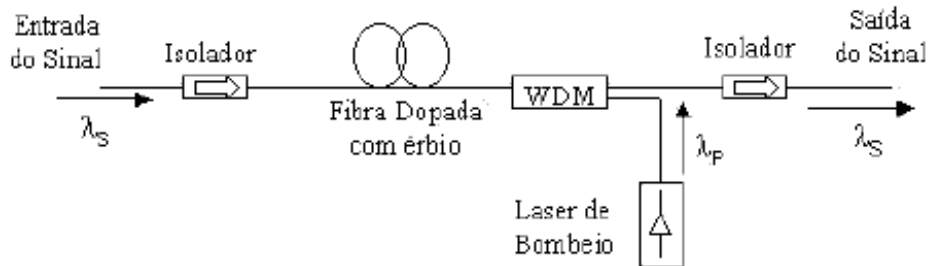


Figura 4.6: EDFA com bombeio contra-propagante

O bombeio bidirecional, ilustrado na Figura 4.7, é resultado da propagação do bombeio nas duas direções possíveis: co e contra-propagante.

O amplificador com bombeio bidirecional apresenta alto ganho e alta potência de saída, podendo o mesmo ser utilizado como amplificador de potência ou amplificador de linha [18].

4.2 Amplificadores Raman

A amplificação Raman já é conhecida há vários anos, porém somente agora com o desenvolvimento da tecnologia na fabricação de *lasers* de bombeio com potências suficientes e conseqüentemente uma redução significativa no preço destes dispositivos, torna-se cada vez mais viável a utilização da amplificação Raman em enlaces comerciais.

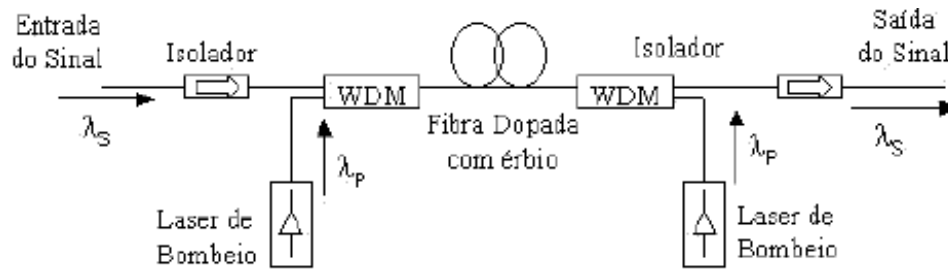


Figura 4.7: EDFA com bombeio bidirecional.

4.2.1 O Espalhamento Raman Estimulado

No espalhamento Raman estimulado a luz espalhada é gerada em direções aleatórias. Em outras palavras pode-se dizer que o espalhamento Raman estimulado transfere energia de um canal com um comprimento de onda menor (maior energia) para um canal de comprimento de onda maior (menor energia) através de interações com fônons, que são modos vibracionais do material que correspondem a uma polarização elétrica oscilante localmente, ao nível de uma célula do material. O Espalhamento Raman Estimulado apresenta vários efeitos de ordem prática, dos quais podemos citar [2]:

- Como se propaga em ambas direções de uma Fibra Óptica, o Espalhamento de Raman, pode vir a ocasionar Modulação Cruzada;
- Pode deslocar efeitos não lineares, tais como: Mistura de Quatro Ondas (*Four Wave Mixing*), Modulação de Fase Cruzada (*Cross Phase Modulation*), Auto Modulação de Fase (*Self Phase Modulation*), e outros, para fora da faixa de passagem do amplificador;
- Pode ainda ocasionar o “roubo” de energia, de um determinado Comprimento de Onda e, transferir desta energia, para um outro Comprimento de Onda. Apesar deste efeito ser aparentemente indesejável, ele pode e, é usado como meio para amplificar sinais ópticos fracos.

4.2.2 A amplificação Raman

O espalhamento Raman pode ser utilizado para amplificar sinais ópticos desde que se propaguem em uma fibra junto com um bombeio de alta potência e que a diferença entre as frequências dos sinais esteja dentro do espectro de Ganho Raman. O bombeio é o sinal de

alta potência que será espalhado inelasticamente para produzir fótons na frequência do sinal que se deseja amplificar [2].

Para que ocorra a amplificação Raman é necessário que a potência de bombeio exceda o limiar Raman fazendo com que o espalhamento Raman estimulado comece a converter a maior parte da intensidade da onda do bombeio em ondas na frequência Stokes, que é a frequência do sinal que se deseja amplificar, e amplifique o sinal co-propagante na fibra [2].

As principais vantagens da amplificação Raman são: seu alto ganho, baixo ruído, larga banda e não requer nenhum tipo especial de fibra, ou seja, pode ser implementado em qualquer fibra de sílica, ao contrário de um EDFA que precisa de uma fibra especial dopada de Erbium. O espectro de ganho Raman possui uma largura de 40THz e pode facilmente ser usado em sistemas WDM, onde os sinais se propagam sob uma larga faixa de frequências. Colocando múltiplos comprimentos de onda de bombeio, pode-se aumentar o espectro de ganho Raman.

Podemos classificar os amplificadores Raman em : discretos ou distribuídos. Na amplificação Raman distribuída o bombeio é transmitido na fibra junto com o sinal. Os amplificadores Raman discretos são independentes dos demais componentes instalados no sistema e têm como único objetivo a amplificação do sinal a ser transmitido [2].

4.2.3 Espectro do Ganho Raman

O espectro de Ganho Raman, $g_R = g(\Omega)$, onde Ω representa a diferença entre a frequência de bombeio e a frequência Stokes, é o parâmetro mais importante para a descrição do Espalhamento Raman Estimulado.

Considerando ondas contínuas ou quase contínuas, onde I_p é a intensidade do bombeio, I_s é a intensidade Stokes e g_R é o coeficiente de ganho Raman, o crescimento inicial das ondas Stokes pode ser descrito por [2]:

$$\frac{\partial I_s}{\partial z} = g_R I_p I_s \quad (4.3)$$

Considere um feixe de bombeio de onda contínua na frequência óptica de ω_p se propagando na fibra. Se, forem lançados na entrada da fibra, um sinal de prova na frequência de ω_s e um feixe de bombeio em ω_p , o sinal será amplificado por causa do ganho Raman (desde que a diferença $\Omega = \omega_p - \omega_s$ esteja dentro do espectro Raman mostrado) [2].

4.2.4 Amplificador Raman

Os Amplificadores Raman foram fabricados pela primeira vez em 1976 e começaram a ser desenvolvidos para redes de transmissões ópticas nos anos 80. As fibras ópticas de sílica podem ser usadas como amplificadores de sinal óptico se o sinal for transmitido junto com uma onda de bombeio de alta potência e a diferença de frequências entre os dois sinais esteja dentro do espectro de ganho Raman. Como o Espalhamento Raman Estimulado é o fenômeno físico responsável pelo mecanismo de amplificação, o nome do amplificador é “Amplificador Raman”.

Tipos de Amplificadores Raman

A Amplificação Raman pode ser dividida em dois tipos, que são:

- Amplificadores Raman Discretos, mais conhecidos pela sigla LRA (Lumped Raman Amplifiers);
- Amplificadores Raman Distribuídos, também conhecidos como DRA (Distributed Raman Amplification).

Amplificadores Raman Discretos - LRA

Estes amplificadores são independentes dos demais componentes instalados no sistema e têm como único objetivo a amplificação do sinal a ser transmitido. Neste tipo de amplificador o Comprimento de Onda do *laser* de Bombeio é que irá determinar a faixa de passagem que este Amplificador irá operar. Sua curva de resposta é moldada com a utilização de:

- Diferentes Comprimentos de Onda emitidos pelo *Laser* de Bombeio;
- Pelo uso de duas ou mais Fontes de Bombeio, cada uma delas operando com *Lasers* de diferentes Comprimentos de Onda;
- Pelo ajuste do Nível de Potência fornecido pela(s) fonte(s) de Bombeio(s);

Amplificadores Raman Distribuído - DRA

Nesta amplificação o bombeio é transmitido na fibra junto com o sinal. DRA utiliza a fibra de transmissão na rede como o ganho médio de raman para obter amplificação.

As principais vantagens, advindas do uso do uso das Amplificações de Raman Distribuídas, além da acima citada, ou seja, o uso em Redes Ópticas já existentes a algum tempo, onde os Cabos de Fibras, não possuem características tão boas em relação aos recentemente desenvolvidos, podemos citar as seguintes:

- Permitem a utilização de Sistemas DWDM, com Menor Espaçamento entre Canais;
- Possibilitam a utilização de Sistemas DWDM, com Altas Taxas de Transmissão;
- Reduzem sobremaneira os ENL (Efeitos Não Lineares), por possibilitar a operação com níveis menores de sinal;
- Melhoria da Figura de Ruído, com relação aos Amplificadores Discretos;
- Permite perdas maiores, o que implica em distâncias maiores entre os pontos de regeneração; Amplificação mais uniforme ao longo do Enlace Óptico.

Capítulo 5

Resultados de Simulações em um Sistema WDM

A utilização de ferramentas de simulação para a análise de um sistema WDM permite a predição do desempenho do sistema de uma forma eficiente, flexível e de baixo custo. Eficiente, pois com uma ferramenta de simulação devidamente ajustada podem-se obter resultados confiáveis para a posterior confrontação com os dados experimentais. A flexibilidade, pois permite que sejam testadas diversas configurações antes para decidir a que melhor se adapta á realidade do projeto a ser implementado na prática. Menor custo, pois o valor de uma ferramenta de simulação é bem inferior ao custo de dispositivos, equipamentos e instrumentos de medição necessários no laboratório.

5.1 Ferramentas de Simulação

Nos estudos realizados, foi utilizada uma ferramenta de simulação: o software *Optisystem* 5.0TM da empresa *Optiwave Systems Inc.*. É uma ferramenta de software avançada que permite projetar, analisar e otimizar virtualmente qualquer tipo de enlace de fibra óptica no nível de camada física. A Figura 5.1 apresenta a GUI do *Optisystem*.

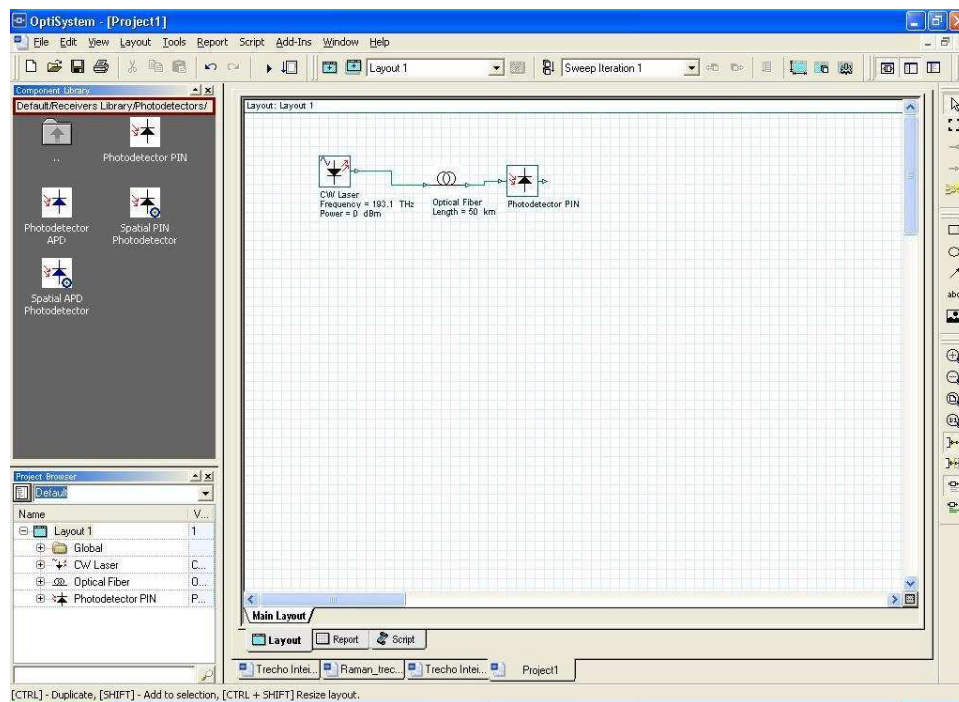


Figura 5.1: Interface gráfica de usuário do *Optisystem*.

A partir da modelagem matemática de dispositivos ópticos reais, esta ferramenta permite simular e avaliar a interação entre os diferentes componentes de um enlace; permite a criação de protótipos de baixo custo; permite uma visão global do desempenho do sistema; acesso direto a extensivas configurações de dados que caracterizam o sistema; realiza varredura de parâmetros visando analisar o efeito de especificações de dispositivos sobre o desempenho do sistema; exploração automática de parâmetros e otimização; redução considerável de risco de investimento; representação visual de opções de projeto e cenários para apresentar aos prospectivos consumidores [22].

A ferramenta oferece uma biblioteca interna com diversos modelos para os dispositivos mais utilizados em comunicação óptica, tais como: lasers, moduladores, multiplexadores/demultiplexadores, fibras ópticas, amplificadores, acopladores, filtros, etc.

A Figura 5.2 mostra a biblioteca de componentes do *Optisystem*.

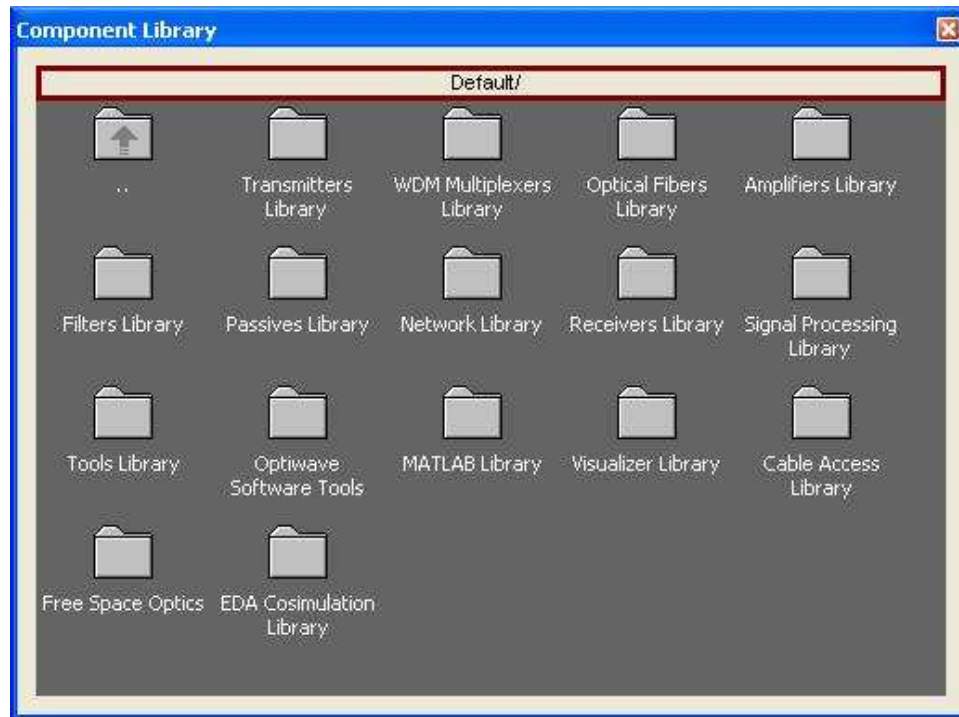


Figura 5.2: Biblioteca de componentes do *Optisystem*.

5.2 Simulações para o enlace óptico do Tramo-Oeste

As simulações realizadas usaram como referência o enlace óptico do Tramo-Oeste das Centrais Elétricas do Norte do Brasil - Eletronorte. A configuração atual dos amplificadores ópticos utilizados e as informações que trafegam na rede são exibidas, respectivamente, nas Figuras 5.3 e 5.4, cedidas pela Eletronorte.

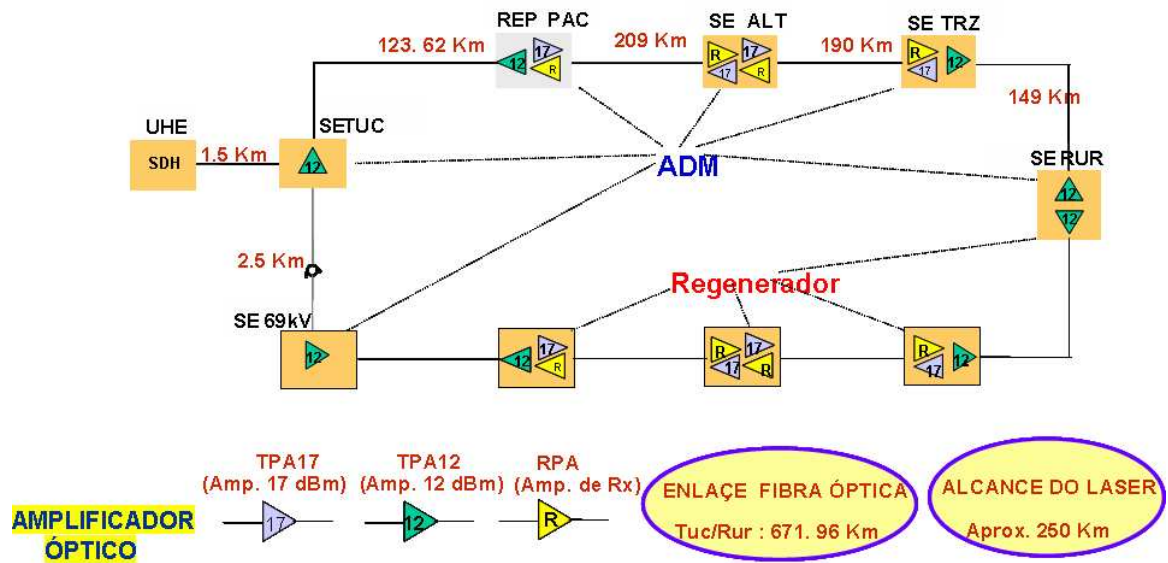


Figura 5.3: Configuração dos amplificadores ópticos na rede. **UHE**: Usina hidrelétrica, **SE-TUC**: Subestação de Tucuruí, **REP-PAC**: Repetidora Pacajá, **SE-ALT**: Subestação de Altamira, **SE-TRZ**: Subestação da Transamazônica, **SE-RUR**: Subestação de Rurópolis, **SDH**: *Synchronous Digital Hierarchy* (Hierarquia digital síncrona), **ADM**: *Add-drop Multiplexing* (Multiplexação insere/deriva).

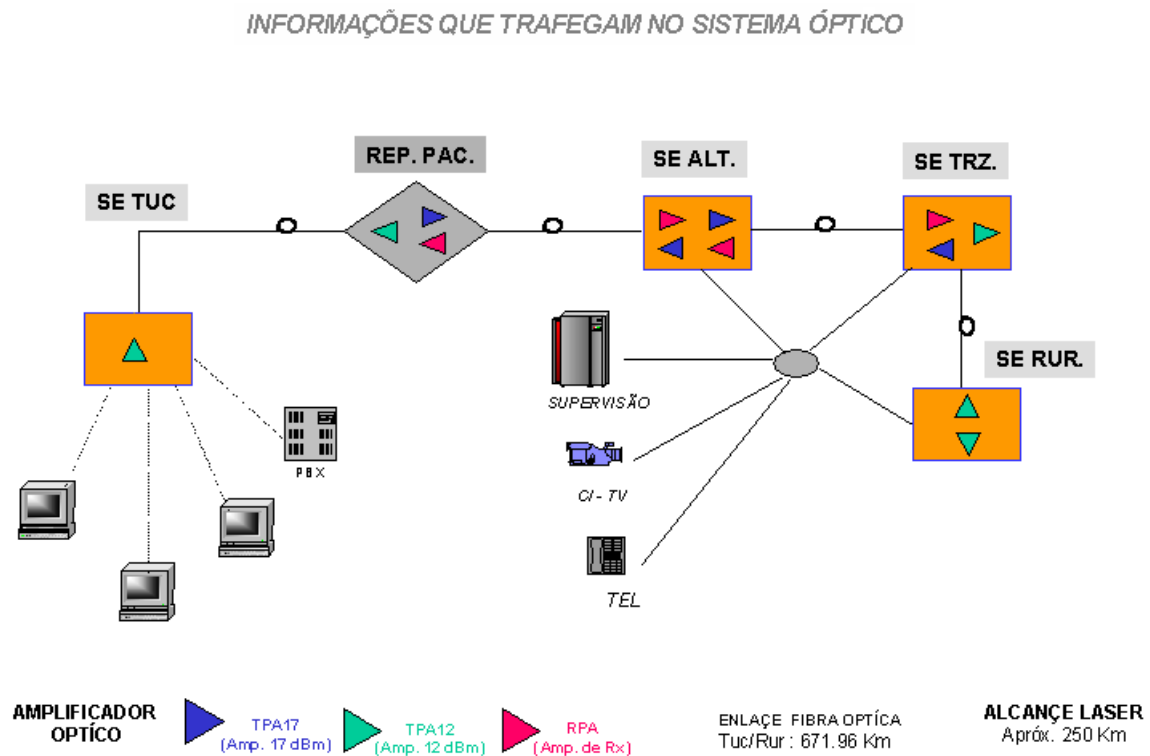


Figura 5.4: Informações sobre os dados que trafegam no sistema óptico.

A rede tem uma extensão total computando o comprimento dos cabos de fibras ópticas do tipo monomodo padrão de aproximadamente 672 km e operam a 1550 nm. As distâncias entre as caixas de emendas variam entre 2 a 4,5 km.

Em [23], foram feitas simulações com a rede atual implantada na Eletronorte. As simulações utilizaram uma taxa de 155 Mb/s (STM-1) que é a taxa de comunicação da empresa Eletronorte. Os valores utilizados para os amplificadores foram fornecidos conforme especificações técnicas do sistema. Utilizou-se a modulação direta aplicada sobre o laser devido à baixa taxa de comunicação implantada.

A primeira simulação corresponde ao trecho de Tucuruí - Pacajá, com fibra óptica com as especificações passadas pela Eletronorte. Para analisar os dados foi utilizado um analisador de BER. O digrama de olho mostrou-se bem aberto, mostrando pouca interferência nesse primeiro trecho.

Continuaram-se as simulações até chegar a Rurópolis (cidade final) totalizando os 672 km. À medida que eram inseridos novos enlaces de fibra era notória a degradação excessiva do sinal. Para obter melhores resultados, optou-se por regenerar o sinal em Altamira, ou seja, o sinal foi convertido em elétrico, através de um fotodetector, e depois utilizado para modular um laser novamente. Feito isto, observou-se uma melhora no sinal. A Figura 5.5 mostra a

estrutura de regeneração para melhorar a recepção.

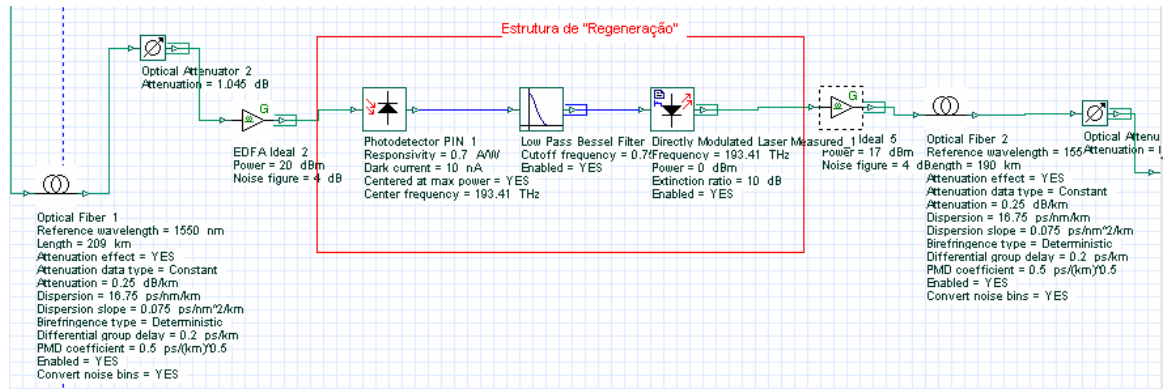


Figura 5.5: Estrutura de Regeneração para melhorar a recepção.

5.2.1 Simulações para a Implantação de um Sistema WDM na Rede Atual da Eletronorte

Para a simulação de um sistema WDM, passamos a considerar a taxa básica de 2,5 Gb/s (STM-16). Porém, analisando os resultados em [23], se aumentarmos a taxa de comunicação, o enlace atual fica limitado à atenuação, dispersão e aos efeitos não-lineares. Portanto, para garantir o funcionamento do sistema, algumas modificações foram feitas. Entre elas, a alteração dos amplificadores e do tipo de modulação, pois a modulação direta não é adequada à alta taxa de bits e aos tempos de resposta característicos dos lasers comerciais. Passamos a utilizar um modulador bastante comum no mercado, o modulador Mach-Zehnder, o qual é um tipo de modulador interferométrico que possibilita modular a intensidade do sinal óptico, sem provocar qualquer modulação na fase, ou seja é possível modular o sinal óptico sem introduzir *chirp*. Um estudo comparativo foi feito para analisar o desempenho da rede WDM utilizando amplificadores EDFA e Raman.

Serão realizadas simulações com 4 e 8 canais no primeiro trecho, para se ter uma visão preliminar da rede da Eletronorte e, logo em seguida, simulações envolvendo todo o enlace.

Para simulações no enlace completo, utilizou-se duas configurações. A configuração 1, que corresponde a rede WDM simulada com amplificadores EDFAs e a configuração 2, onde alterou-se o trecho de Tucuruí até Altamira, substituindo os dois primeiros amplificadores EDFA por três amplificadores Raman e foi eliminada a regeneração do trecho de Tucuruí a Altamira.

A Figura 5.6 apresenta a configuração 1, que é um esquema simplificado da rede WDM simulada com amplificadores EDFAs.

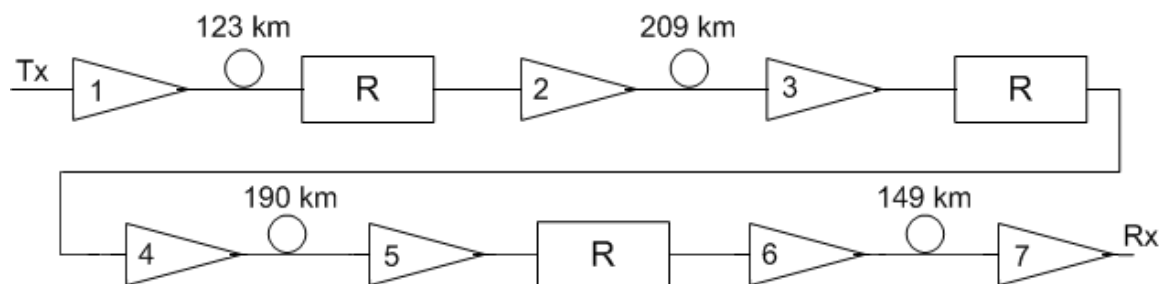


Figura 5.6: Configuração 1 - Rede WDM com os 7 amplificadores EDFAs (sendo 1, 2, 4 e 6 amplificadores de potência e 3, 5 e 7 pré-amplificadores) e 3 regeneradores.

5.2.2 Simulações com Quatro Canais no 1º Trecho do Enlace

As simulações do sistema WDM foram feitas a uma taxa de 2,5 Gb/s em cada canal. O espaçamento entre os canais foi de 200MHz e seguindo a recomendação G.692 da ITU-T, as frequências foram alocadas em 193,1, 193,3, 193,5 e 193,7 THz.

O primeiro trecho do enlace (Tucuruí a Pacajá) de 123,62 km foi simulado de acordo com as suas características atuais. O *layout* de simulação, utilizando o amplificador EDFA ideal é mostrado na Figura 5.7.

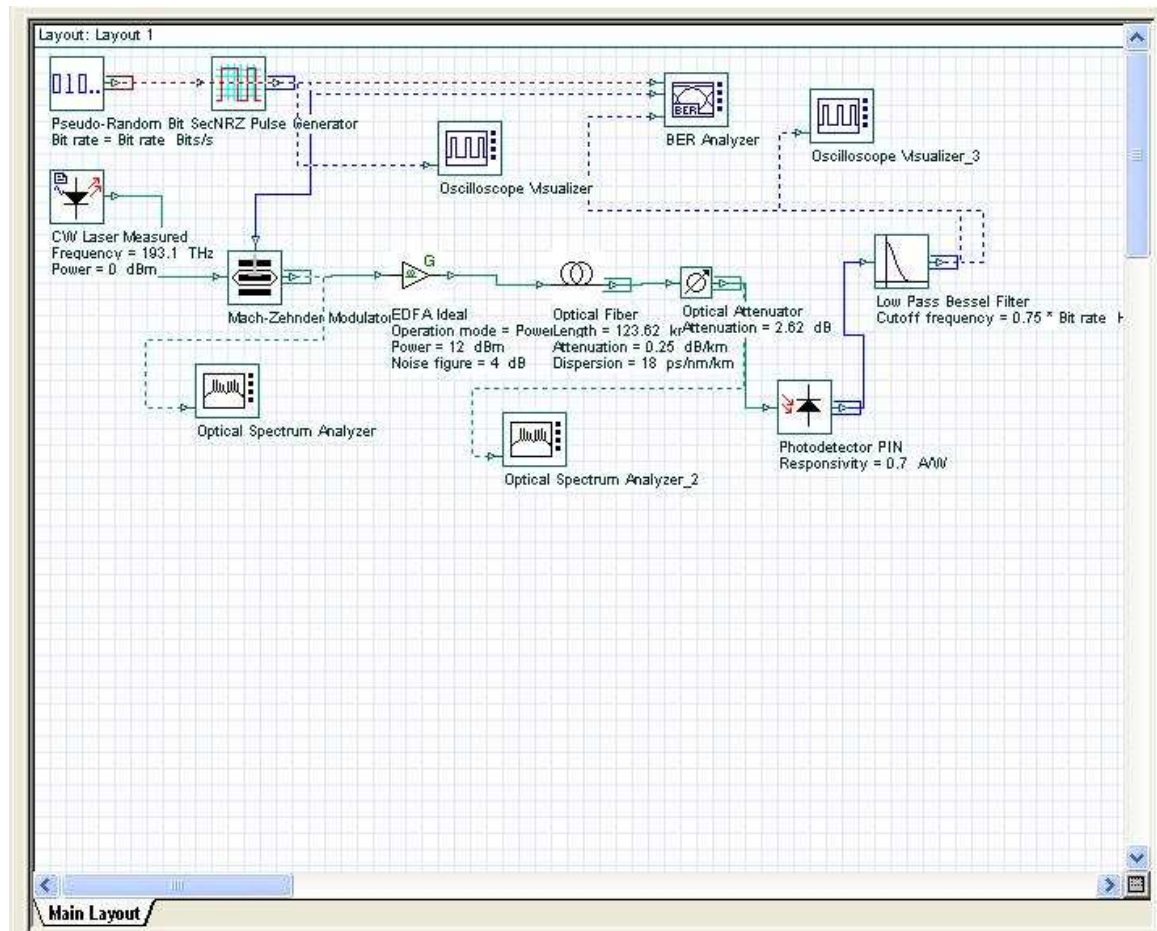


Figura 5.7: Layout do primeiro trecho utilizando o amplificador EDFA ideal.

O diagrama de olho e a curva do fator Q para o sinal no 1º trecho do enlace Tramo-Oeste são mostrados na Figura 5.8.

As medições feitas pelo analisador de BER no final do 1º trecho do enlace para os quatro canais são mostradas na Tabela 5.1.

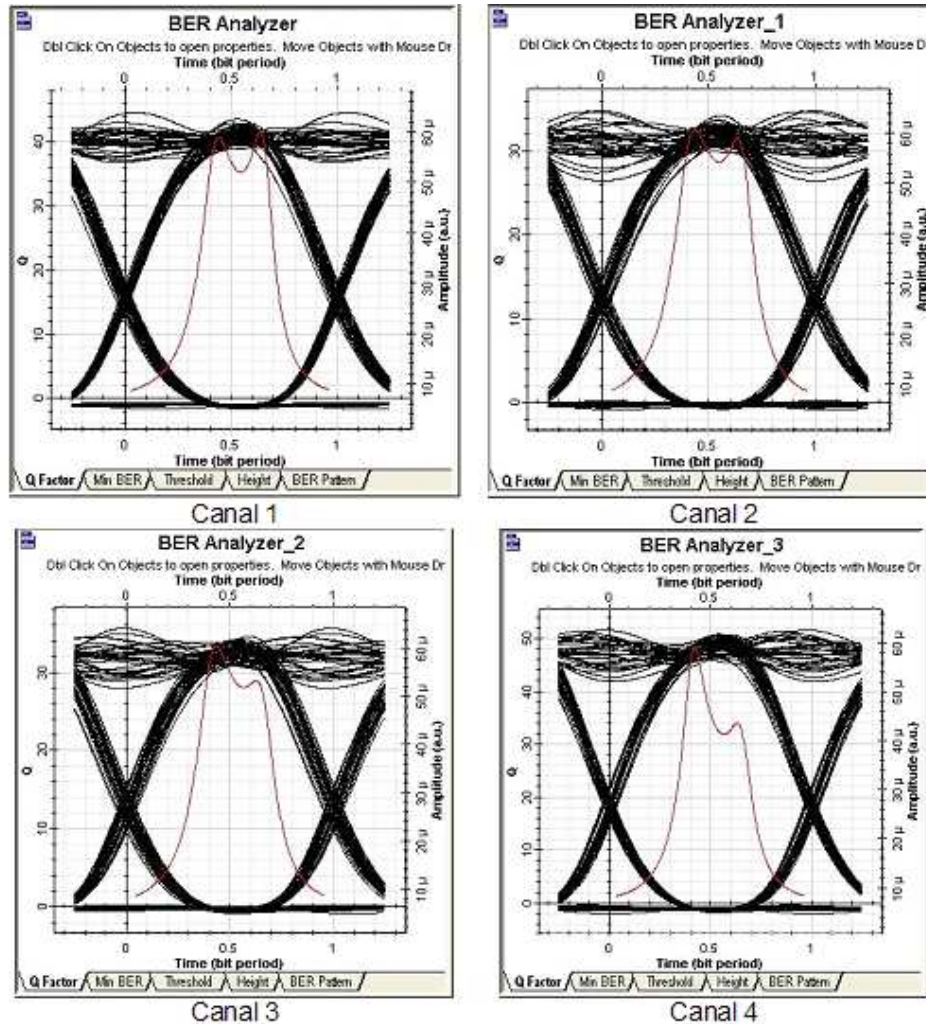


Figura 5.8: Diagrama de olho dos quatro canais no final do 1º trecho (123.62 km) do Tramo-Oeste com amplificador EDFA.

Tabela 5.1: Fator Q dos quatro canais após enlace com 123,62 km de fibra com amplificador EDFA ideal.

Canal	Comprimento de onda (nm)	Frequência (THz)	Fator Q
1	1552,52	193,1	41,64
2	1550,92	193,3	32,57
3	1549,32	193,5	33,32
4	1547,72	193,7	48,19

A Figura 5.9 mostra o espectro dos canais ópticos na saída do modulador de Mach-Zehnder.

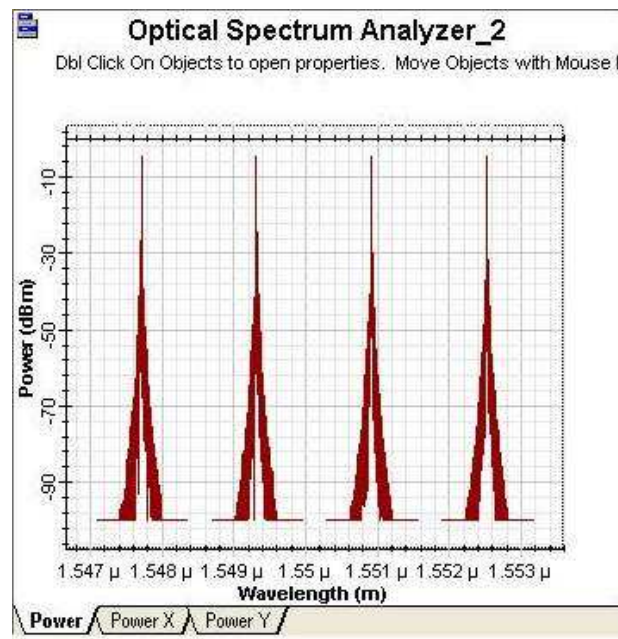


Figura 5.9: Diagrama de olho dos quatro canais no final do 1º trecho (123.62 km) do Tramo-Oeste com amplificador EDFA.

A Figura 5.10 mostra o espectro dos canais ópticos com amplificador EDFA na saída do enlace do 1º trecho.

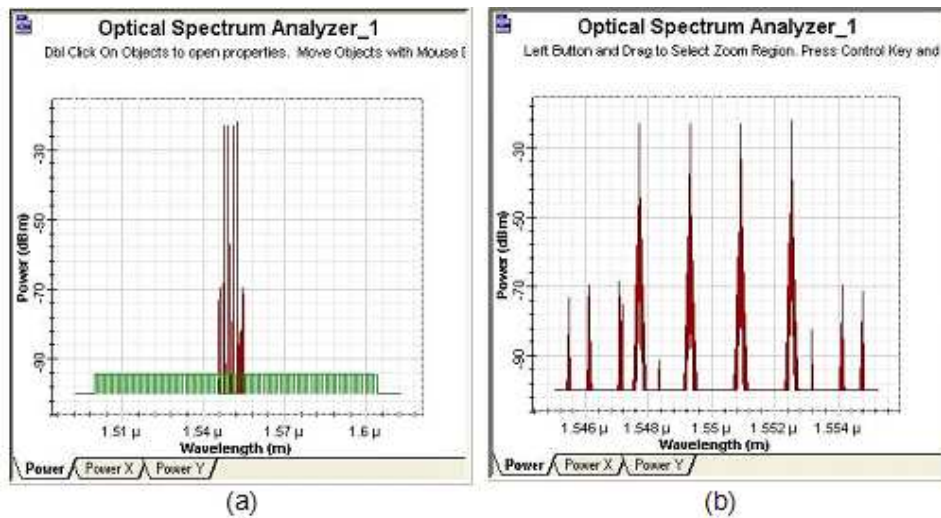


Figura 5.10: Diagrama espectral dos quatro canais ópticos na saída do enlace do 1º trecho. (a) canais em meio ao ruído ASE, (b) canais sem o ruído ASE.

Para este mesmo trecho, alteramos a configuração do enlace, substituindo o amplificador EDFA por um Raman. O diagrama de olho e a curva do fator Q para o sinal com amplificação Raman no 1º trecho do enlace Tramo-Oeste é mostrada na Figura 5.11. As medições feitas pelo analisador de BER no final do enlace para os quatro canais são mostradas na Tabela 5.2.

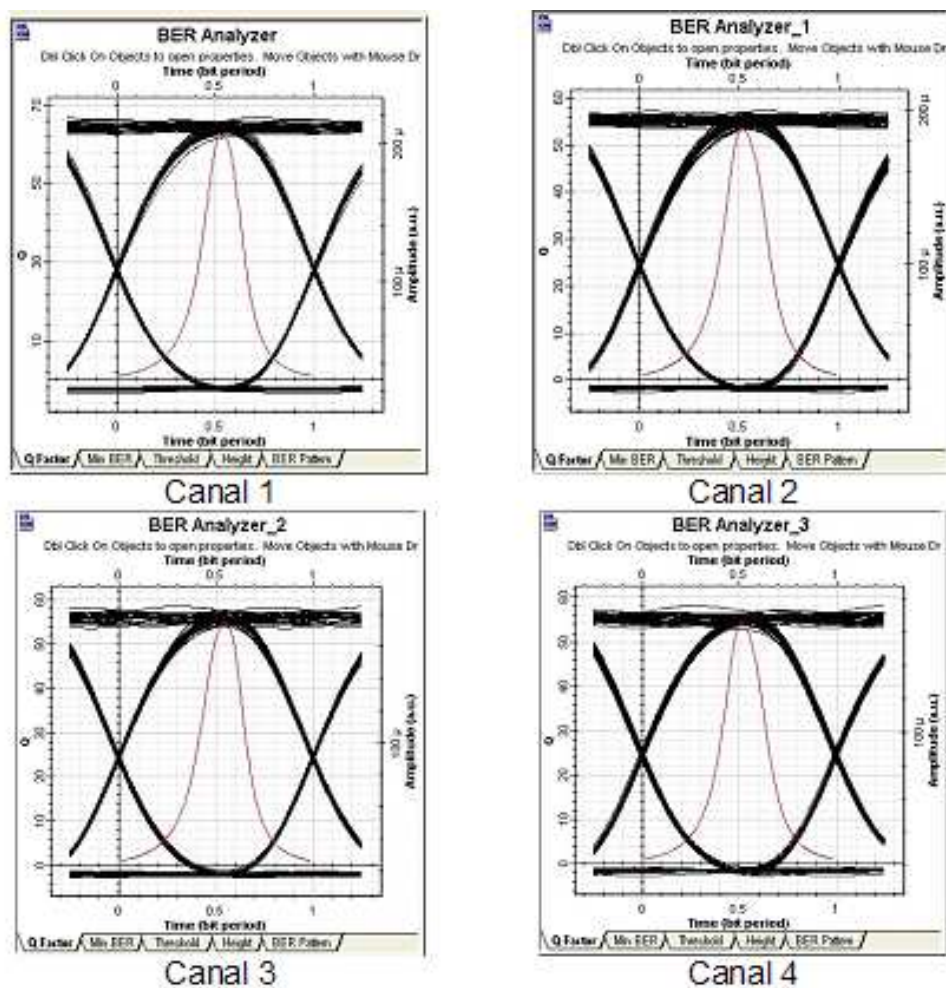


Figura 5.11: Diagrama de olho dos quatro canais no final do 1º trecho (123.62 km) do Tramo-Oeste com amplificador Raman.

Tabela 5.2: Fator Q dos quatro canais após enlace de 123,62 km de fibra com amplificador Raman.

Canal	Comprimento de onda (nm)	Frequência (THz)	Fator Q
1	1552,52	193,1	62,38
2	1550,92	193,3	53,49
3	1549,32	193,5	54,66
4	1547,72	193,7	54,29

A Figura 5.12 mostra o espectro dos canais ópticos com amplificação Raman na saída do enlace do 1º trecho.

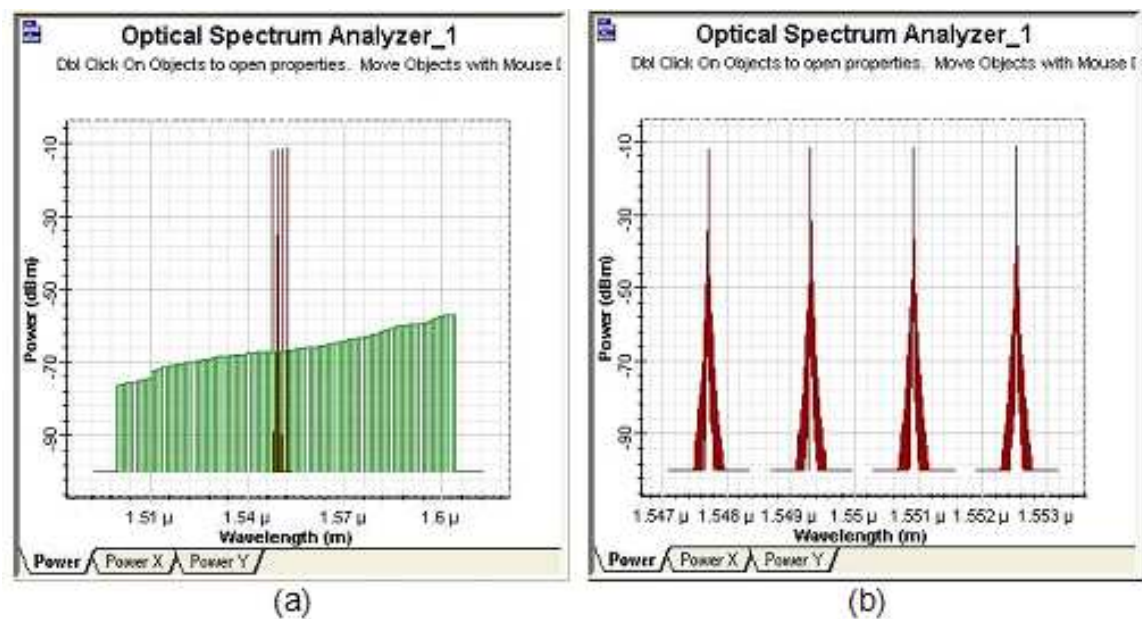


Figura 5.12: Diagrama espectral dos quatro canais ópticos na saída na saída do enlace do 1º trecho. (a) canais em meio ao ruído ASE, (b) canais sem o ruído ASE.

Com estes resultados, pode-se concluir que a transmissão do sinal de 2,5 Gb/s no primeiro trecho é altamente confiável seja com amplificador EDFA quanto com amplificador Raman. Em ambos, os diagramas de olho apresentaram-se bem abertos, mostrando relativamente pouca interferência inter-simbólica neste primeiro trecho. Porém, a rede WDM com amplificador Raman apresentou melhor desempenho do que com amplificador EDFA.

5.2.3 Simulações com Quatro Canais no Enlace Completo

Os resultados obtidos da primeira análise feita no trecho Tucuruí - Pacajá com apenas quatro canais com amplificação óptica foram satisfatórios. Posteriormente, foi testado todo o enlace de Tucuruí a Rurópolis, totalizando os 672 km de enlace.

Nesta etapa do projeto foi realizada uma modificação do amplificador EDFA utilizado. Até este ponto utilizou-se um modelo de amplificador EDFA ideal, no entanto, baseado em [23], para aumentar a qualidade das simulações e torná-las mais próximas das características reais da rede, passou-se a utilizar o modelo de amplificador representado na Figura 5.13.

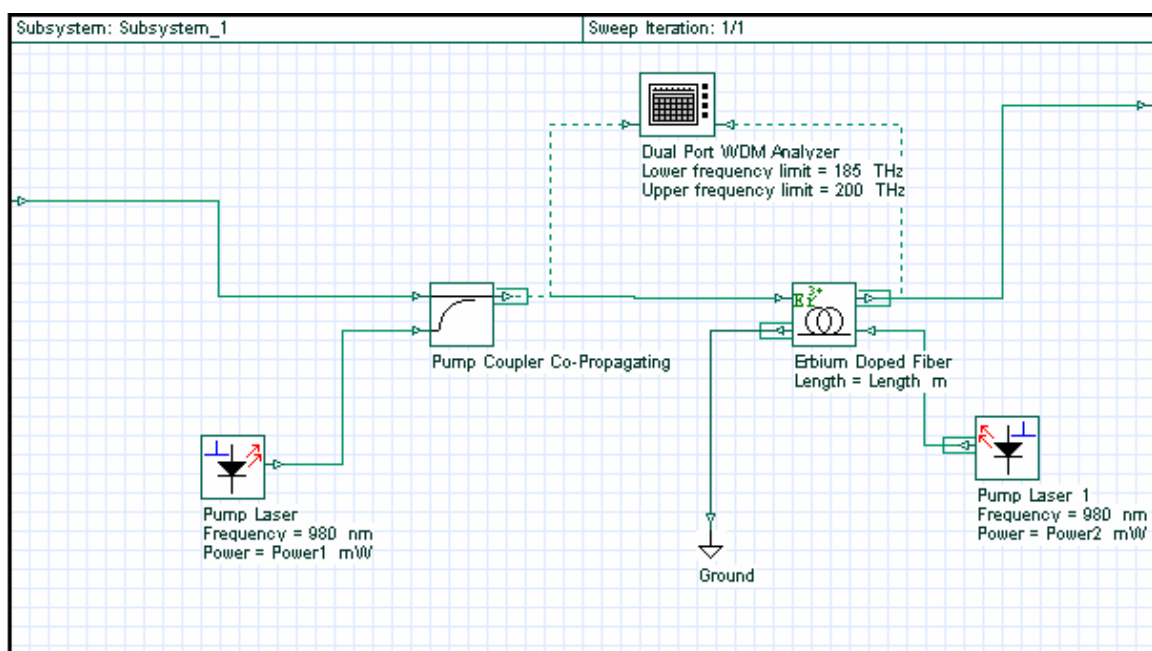


Figura 5.13: Modelo EDFA simulado.

Para este modelo, foram utilizados dois lasers de bombeio de 980 nm, com potência variando de acordo com o ganho desejado. Os amplificadores EDFAs foram posicionados conforme configuração 1.

O diagrama de olho e a curva do fator Q em Rurópolis no enlace direto após 672 km de fibra com amplificação EDFA são mostrados na Figura 5.14.

As medições feitas pelo analisador de BER no final do enlace para os quatro canais são mostradas na Tabela 5.3.

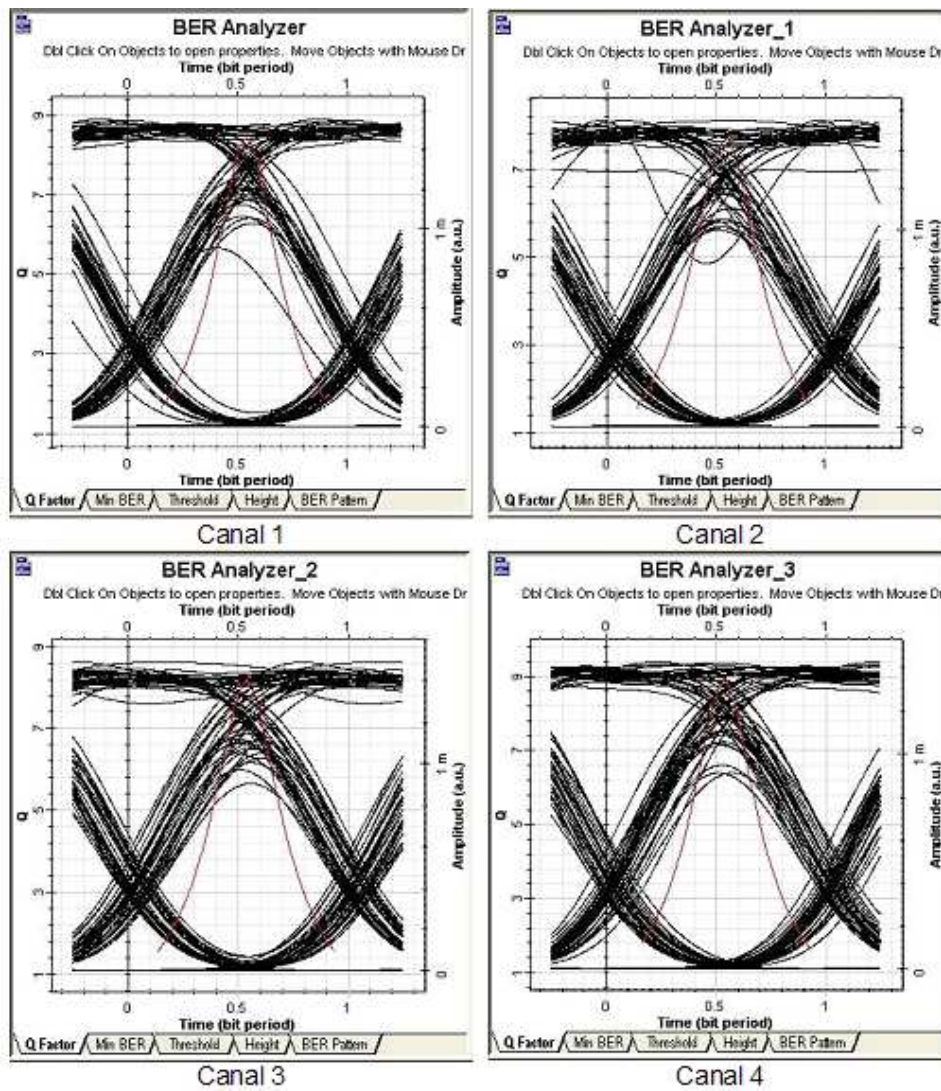


Figura 5.14: Diagrama de olho dos quatro canais no final do enlace (672 km) do Tramo-Oeste com amplificador EDFA.

Tabela 5.3: Fator Q e BER dos quatro canais após enlace de 672 km de fibra com amplificador EDFA.

Canal	Comprimento de onda (nm)	Frequência (THz)	Fator Q	BER
1	1552,52	193,1	8,40	$1,3 \times 10^{-17}$
2	1550,92	193,3	7,68	$4,52 \times 10^{-15}$
3	1549,32	193,5	8,14	$1,27 \times 10^{-16}$
4	1547,72	193,7	8,87	$2,33 \times 10^{-19}$

A Figura 5.15 mostra o espectro dos canais ópticos com amplificador EDFA na saída do enlace total.

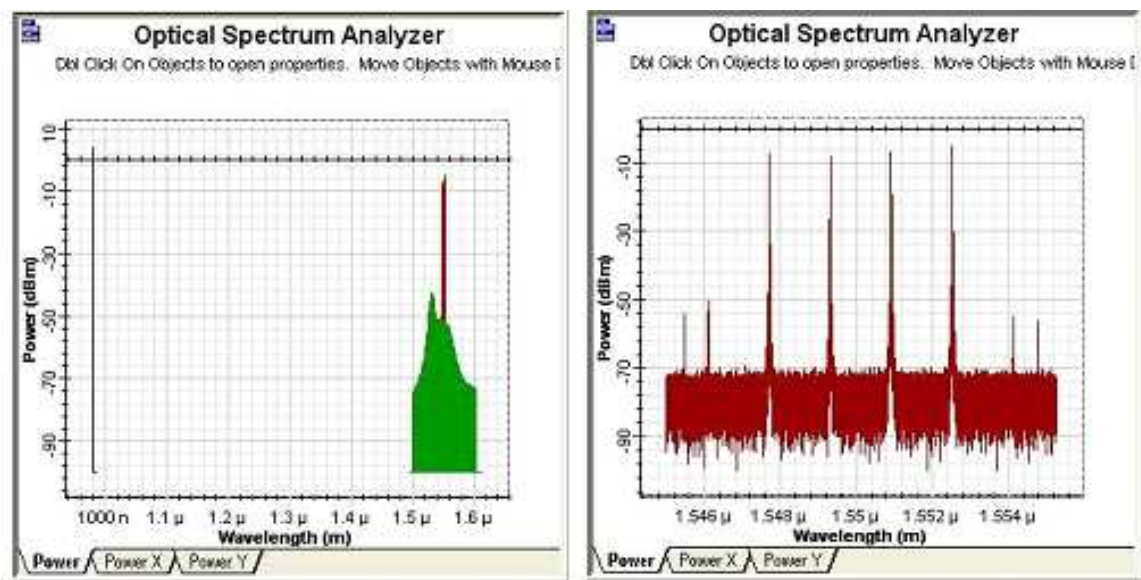


Figura 5.15: Diagrama espectral dos quatro canais ópticos na saída na saída do enlace total. (a) sinal de bombeio (980 nm) e os quatro canais em meio ao ruído ASE , (b) canais sem o ruído ASE.

Para este mesmo trecho, utilizou-se a configuração 2 a qual utiliza amplificação Raman juntamente com os amplificadores EDFAs.

O diagrama de olho e a curva do fator Q para o sinal com amplificação Raman no enlace após 672 km de fibra são mostrados na Figura 5.16.

As medições feitas pelo analisador de BER no final do enlace para os quatro canais são mostradas na Tabela 5.4.

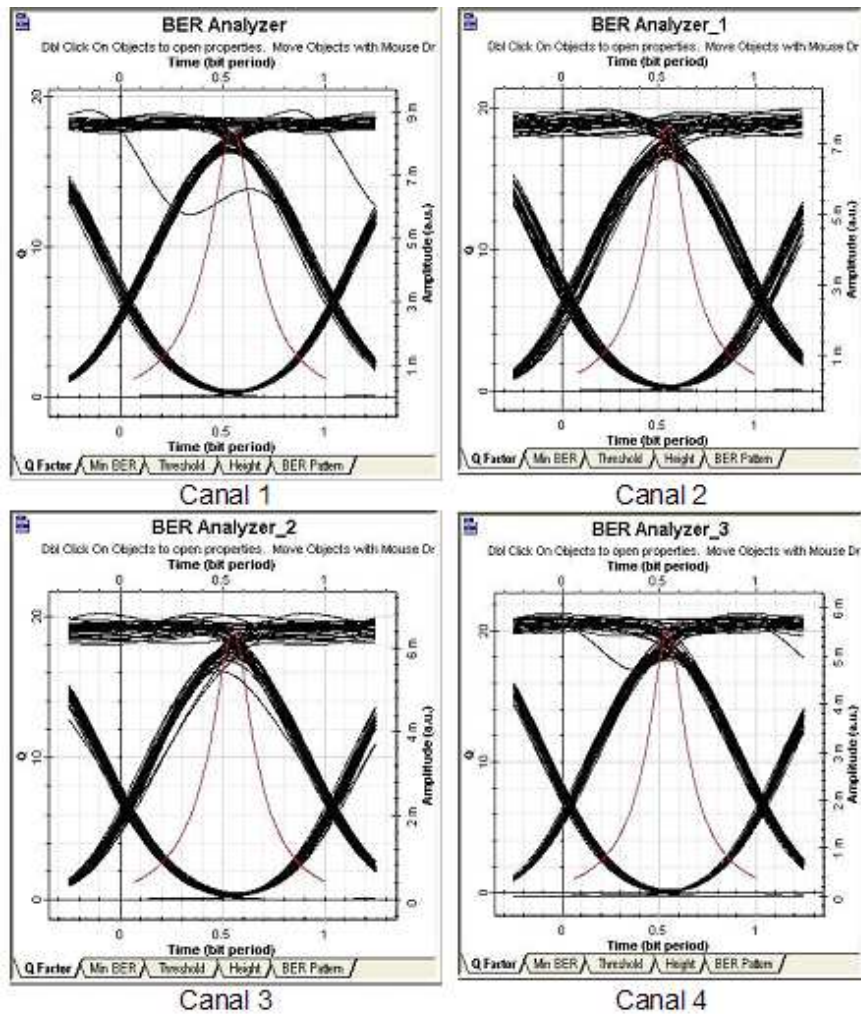


Figura 5.16: Diagrama de olho dos quatro canais no final do enlace (672 km) do Tramo-Oeste com amplificador Raman.

Tabela 5.4: Fator Q e BER dos quatro canais após enlace de 672 km de fibra com amplificador EDFA.

Canal	Comprimento de onda (nm)	Frequência (THz)	Fator Q	BER
1	1552,52	193,1	17,89	$4,41 \times 10^{-72}$
2	1550,92	193,3	18,69	$1,83 \times 10^{-78}$
3	1549,32	193,5	18,94	$1,72 \times 10^{-80}$
4	1547,72	193,7	19,93	$7,78 \times 10^{-89}$

A Figura 5.17 mostra o espectro dos canais ópticos com amplificador Raman na saída do enlace.

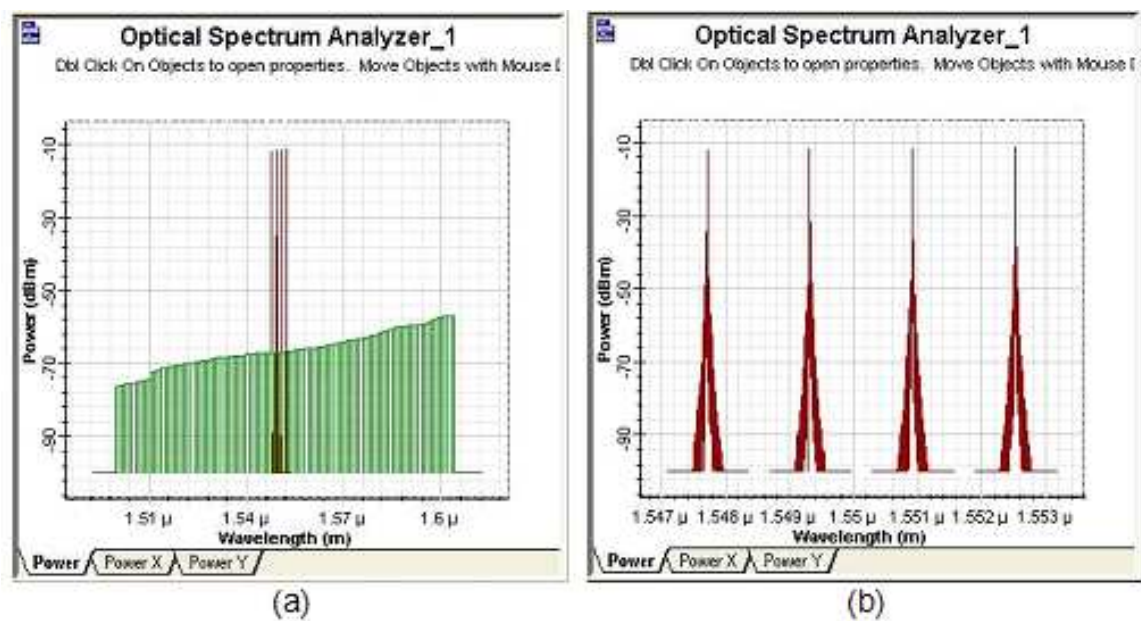


Figura 5.17: Diagrama espectral dos quatro canais ópticos na saída na saída do enlace. (a) canais em meio ao ruído ASE, (b) canais sem o ruído ASE.

Com estes resultados, concluímos que a transmissão do sinal de 2,5 Gb/s ao final do enlace em Rurópolis apresentou uma ligeira queda no desempenho em relação ao primeiro enlace, porém os diagramas de olho ainda apresentam-se bem abertos e os valores do fator Q e da BER mostram uma transmissão com qualidade em ambas as configurações dos amplificadores. A rede WDM com amplificador Raman continuou apresentando melhor desempenho do que com amplificador EDFA.

5.2.4 Simulações com Oito Canais no 1º Trecho do Enlace

Para a simulações do sistema WDM a uma taxa de 2,5 Gb/s em cada canal, mantivemos o espaçamento entre os canais de 200MHz. As frequências utilizadas foram: 193,1, 193,3, 193,5 e 193,7, 193,9, 194,1 194,3 e 194,5 THz.

O diagrama de olho e a curva do fator Q para o sinal com amplificador EDFA no 1º trecho do enlace Tramo-Oeste são mostrados nas Figuras 5.18 e 5.19.

As medições feitas pelo analisador de BER no final do enlace para os oito canais são mostradas na Tabela 5.5.

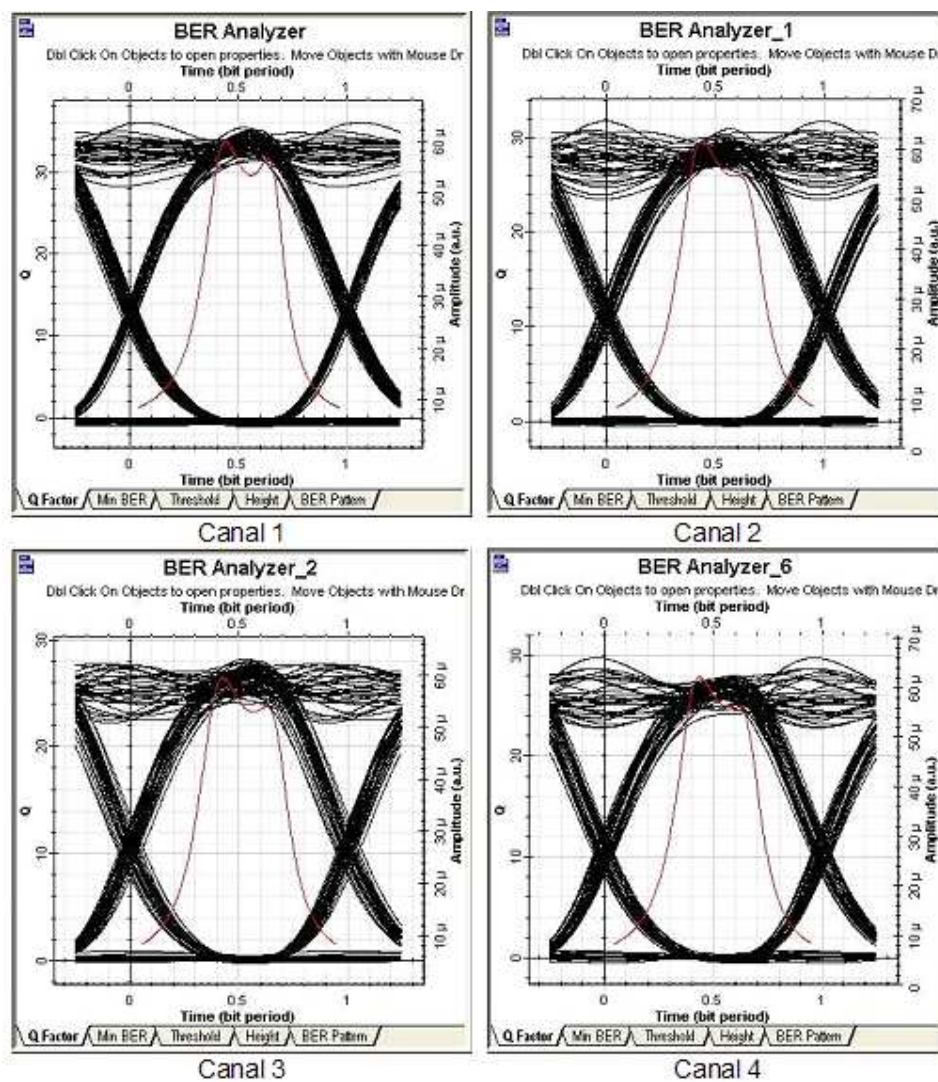


Figura 5.18: Diagrama de olho dos canais de 1 a 4 no final do 1º trecho (123.62 km) do Tramo-Oeste com amplificador EDFA.

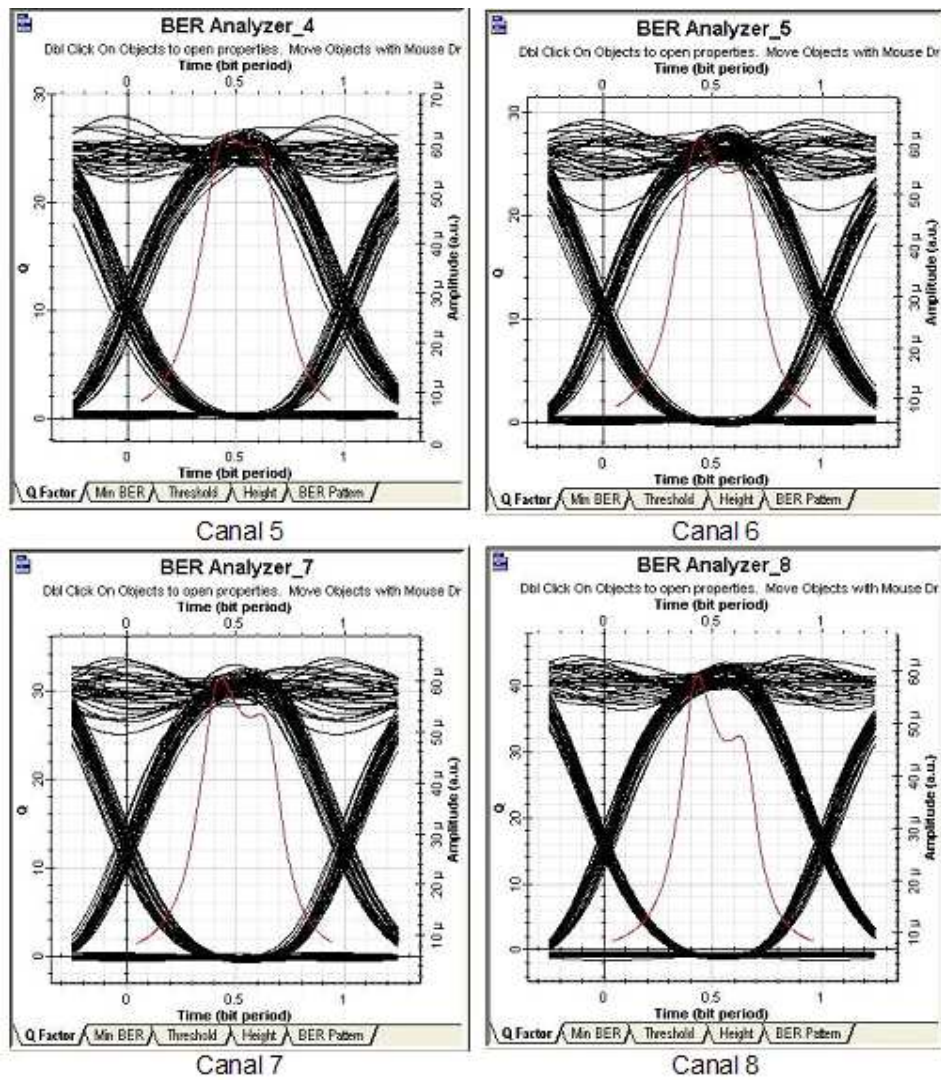


Figura 5.19: Diagrama de olho dos canais de 5 a 8 no final do 1º trecho (123.62 km) do Tramo-Oeste com amplificador EDFA.

Tabela 5.5: Fator Q dos oito canais após enlace de 123,62 km de fibra com amplificador EDFA.

Canal	Comprimento de onda (nm)	Frequência (THz)	Fator Q
1	1552,52	193,1	33,69
2	1550,92	193,3	29,67
3	1549,32	193,5	26,41
4	1547,72	193,7	27,82
5	1546,11	193,9	26,16
6	1544,52	194,1	27,40
7	1542,9	194,3	31,48
8	1541,34	194,5	41,64

A Figura 5.20 mostra o espectro dos oito canais ópticos com amplificador EDFA na saída do enlace do 1º trecho.

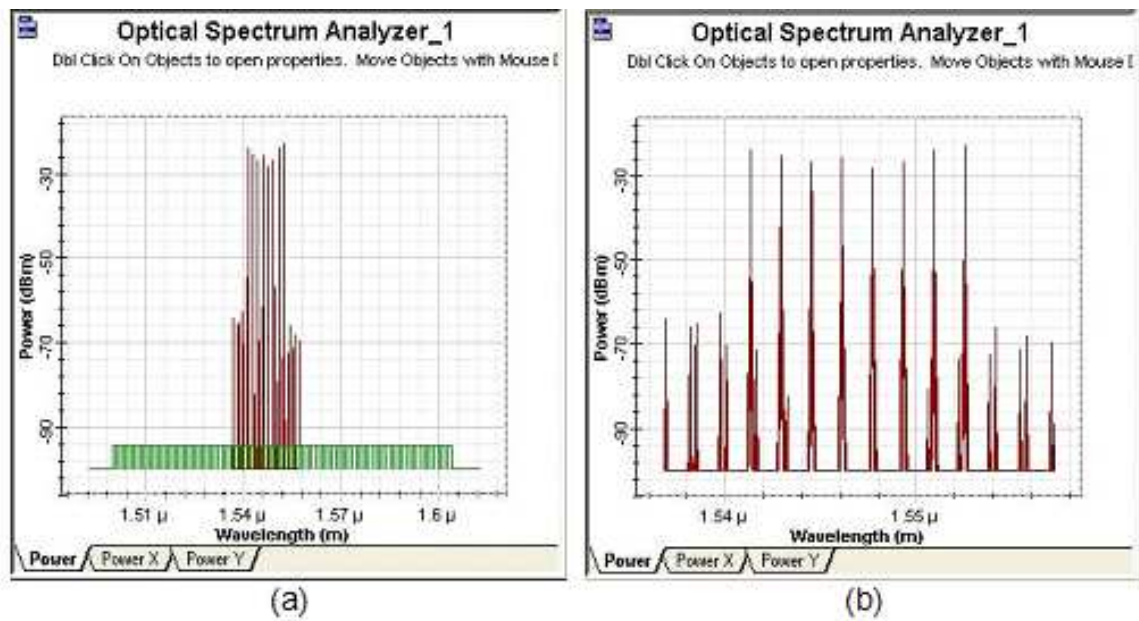


Figura 5.20: Diagrama espectral dos oito canais ópticos na saída na saída do enlace do 1º trecho. (a) canais em meio ao ruído ASE, (b) canais sem o ruído ASE.

Para este mesmo trecho, alterou-se a configuração do enlace para a configuração 2. O diagrama de olho e a curva do fator Q para o sinal com amplificação Raman no 1º trecho do enlace Tramo-Oeste são mostrados nas Figuras 5.21 e 5.22.

As medições feitas pelo analisador de BER no final do enlace para os oito canais são mostradas na Tabela 5.6.

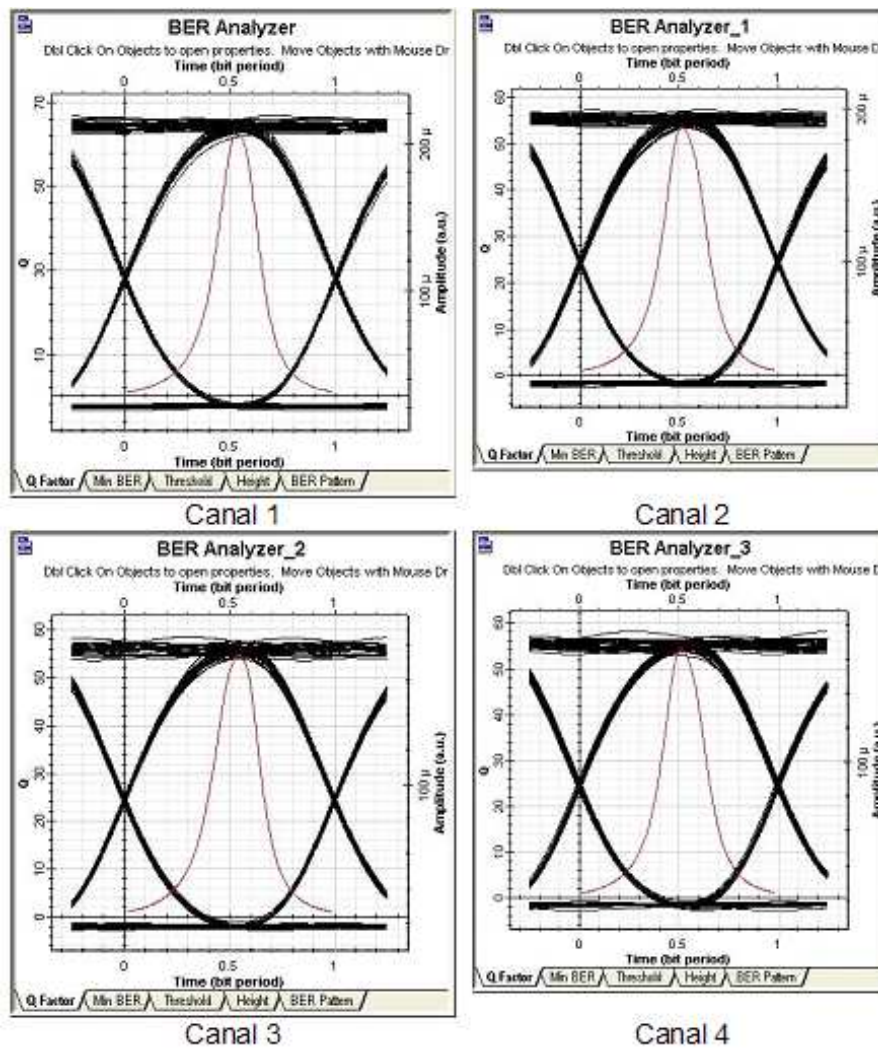


Figura 5.21: Diagrama de olho dos canais de 1 a 4 no final do 1º trecho (123.62 km) do Tramo-Oeste com amplificador Raman.

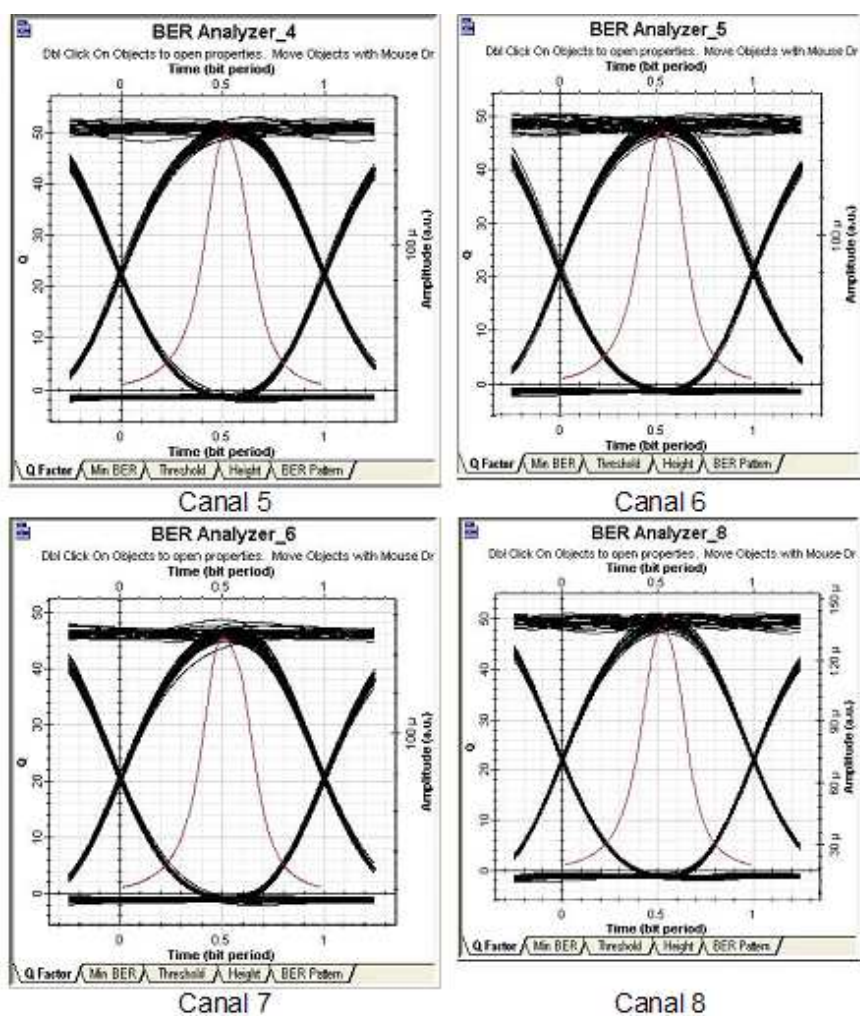


Figura 5.22: Diagrama de olho dos canais de 5 a 8 no final do 1º trecho (123.62 km) do Tramo-Oeste com amplificador Raman.

Tabela 5.6: Fator Q dos oito canais após enlace com 123,62 km de fibra com amplificador Raman.

Canal	Comprimento de onda (nm)	Frequência (THz)	Fator Q
1	1552,52	193,1	62,38
2	1550,92	193,3	53,49
3	1549,32	193,5	54,66
4	1547,72	193,7	54,29
5	1546,11	193,9	49,41
6	1544,52	194,1	47,06
7	1542,9	194,3	47,53
8	1541,34	194,5	47,82

A Figura 5.23 mostra o espectro dos oito canais ópticos com amplificador Raman na saída do enlace do 1º trecho.

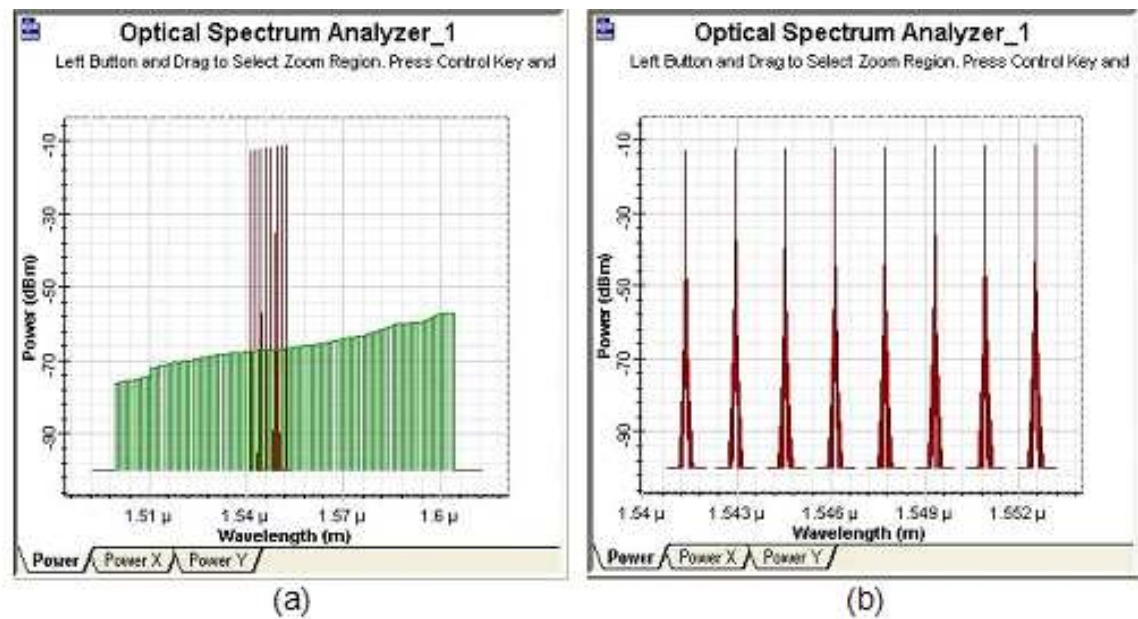


Figura 5.23: Diagrama espectral dos quatro canais ópticos na saída na saída do enlace do 1º trecho. (a) canais em meio ao ruído ASE, (b) canais sem o ruído ASE.

Comparando os resultados, o diagrama espectral na saída do enlace com amplificação EDFA apresenta o aparecimento de efeitos não-lineares, com o aparecimento de novas raias no espectro que são resultados da mistura de quatro ondas (FWM). Porém, a qualidade da transmissão ainda é assegurada. Ambas as configurações ainda apresentam bom desempenho.

5.2.5 Simulações com Oito Canais no Enlace Completo

Os resultados obtidos da primeira análise feita no trecho Tucuruí - Pacajá com apenas oito canais com amplificação óptica foram satisfatórios. Posteriormente, foi testado todo o enlace de Tucuruí a Ruropólis, totalizando os 672 km de enlace.

O diagrama de olho e a curva do fator Q para o sinal no enlace completo Tramo-Oeste com amplificação EDFA são mostrados nas Figuras 5.24 e 5.25.

As medições feitas pelo analisador de BER no final do enlace para os oito canais são mostradas na Tabela 5.7.

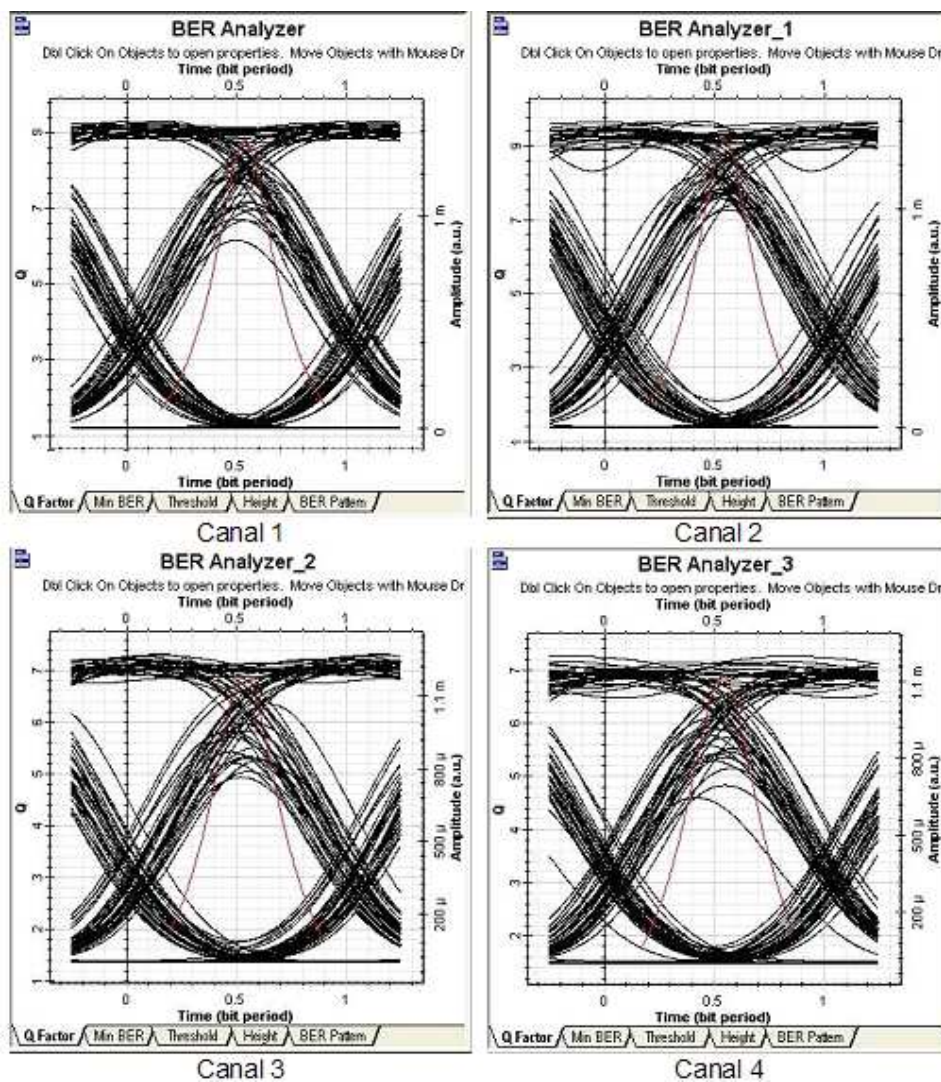


Figura 5.24: Diagrama de olho dos canais de 1 a 4 no final do enlace (672 km) do Tramo-Oeste com amplificador EDFA.

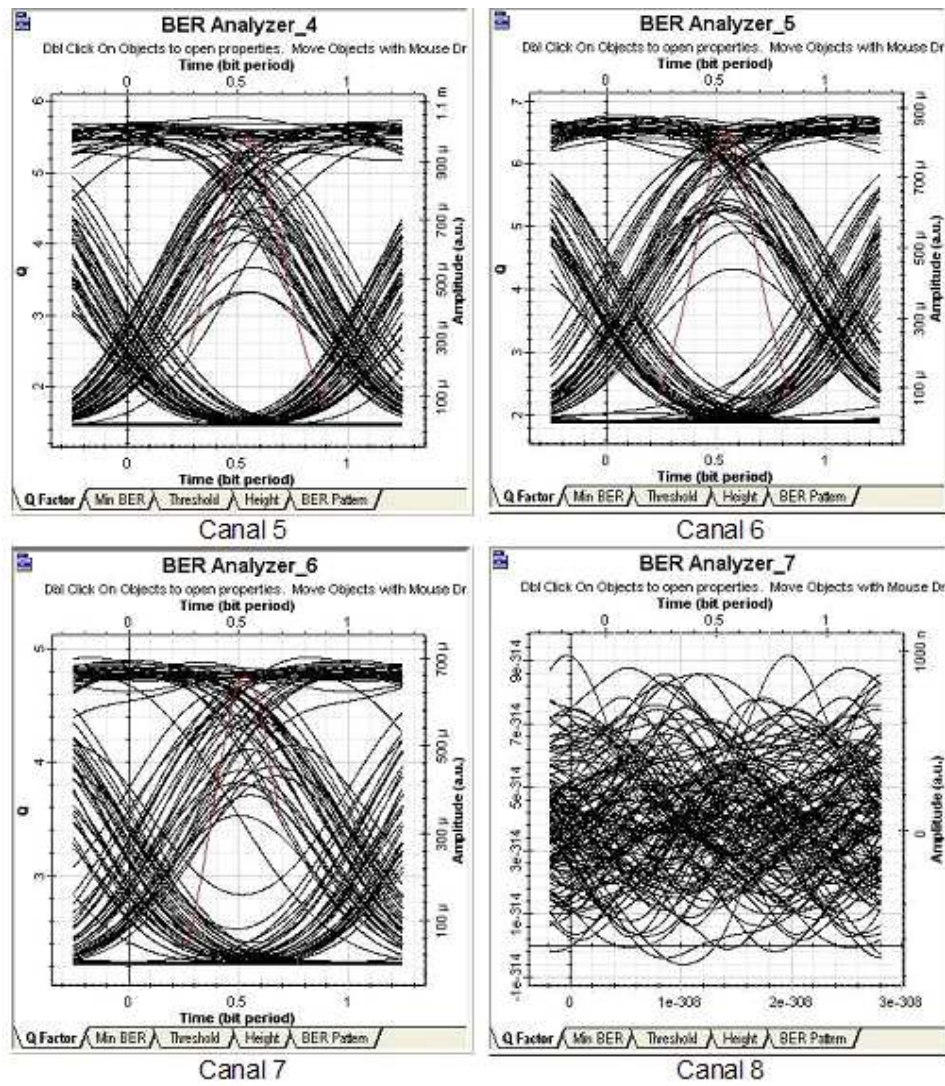


Figura 5.25: Diagrama de olho dos canais de 5 a 8 no final do enlace (672 km) do Tramo-Oeste com amplificador EDFA.

Tabela 5.7: Fator Q e BER dos oito canais após enlace com 672 km de fibra com amplificador Raman.

Canal	Comprimento de onda (nm)	Frequência (THz)	Fator Q	BER
1	1552,52	193,1	8,78	$5,53 \times 10^{-19}$
2	1550,92	193,3	9,16	$1,97 \times 10^{-20}$
3	1549,32	193,5	6,94	$1,36 \times 10^{-12}$
4	1547,72	193,7	6,89	$1,83 \times 10^{-12}$
5	1546,11	193,9	5,50	$1,16 \times 10^{-8}$
6	1544,52	194,1	6,46	$4,18 \times 10^{-11}$
7	1542,9	194,3	4,75	$8,27 \times 10^{-7}$
8	1541,34	194,5	-	-

Nenhum valor foi colocado no campo referente ao canal 8 para o fator Q e BER, pois não foi indicado nenhum valor no visualizador, devido a degradação do sinal.

A Figura 5.26 mostra o espectro dos oito canais ópticos com amplificador EDFA na saída do enlace do enlace total.

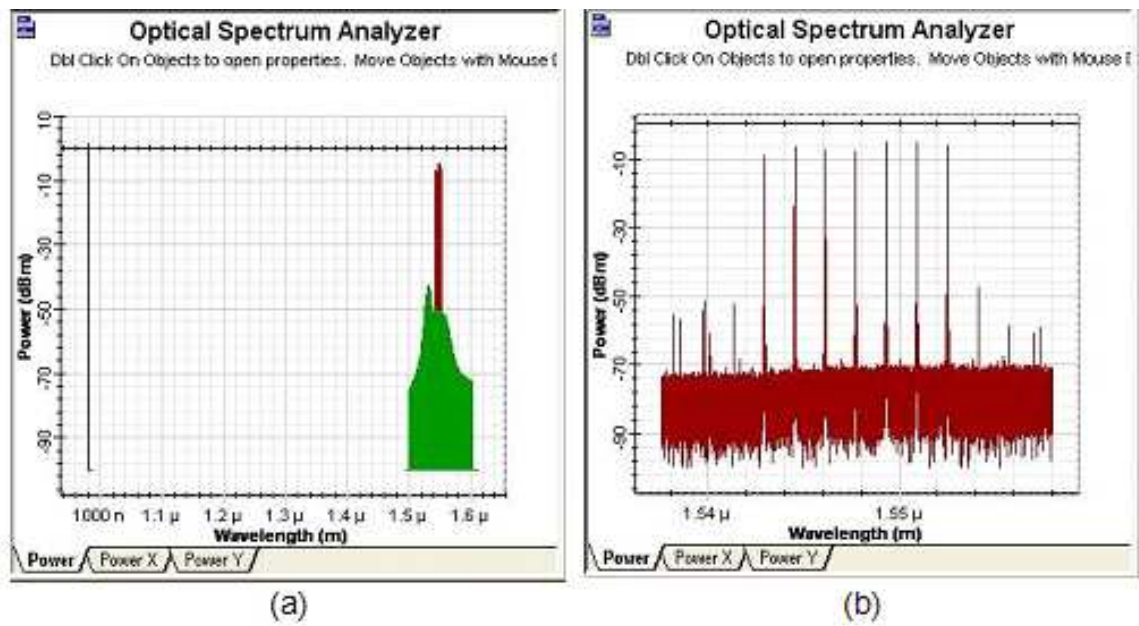


Figura 5.26: Diagrama espectral dos oito canais ópticos na saída na saída do enlace do enlace. (a) sinal de bombeio (980 nm) e os oito canais em meio ao ruído ASE, (b) canais sem o ruído ASE.

Para este mesmo trecho, alterando-se a configuração do enlace para a configuração 2, pode-se comparar o desempenho das redes.

O diagrama de olho e a curva do fator Q para o sinal com amplificação Raman no enlace Tramo-Oeste são mostrados nas Figuras 5.27 e 5.28.

As medições feitas pelo analisador de BER no final do enlace para os oito canais são mostradas na Tabela 5.8.

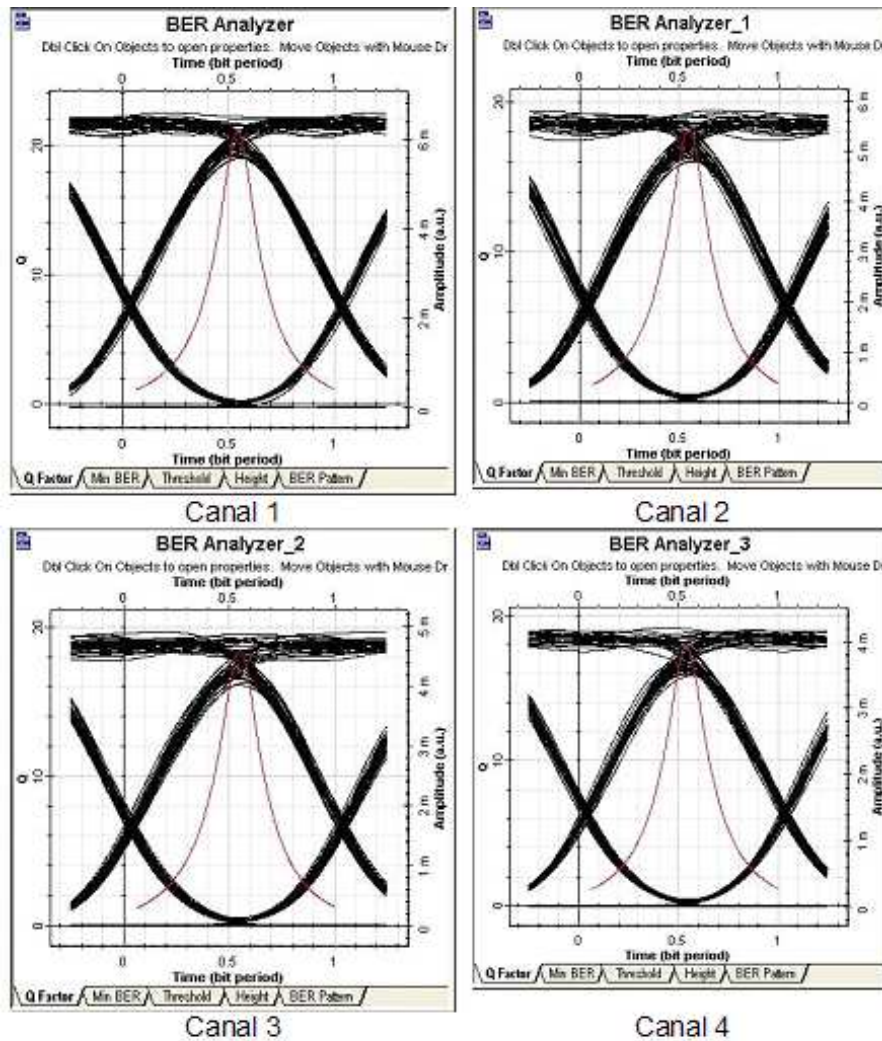


Figura 5.27: Diagrama de olho dos canais de 1 a 4 no final de todo o enlace (672 km) do Tramo-Oeste com amplificador Raman.

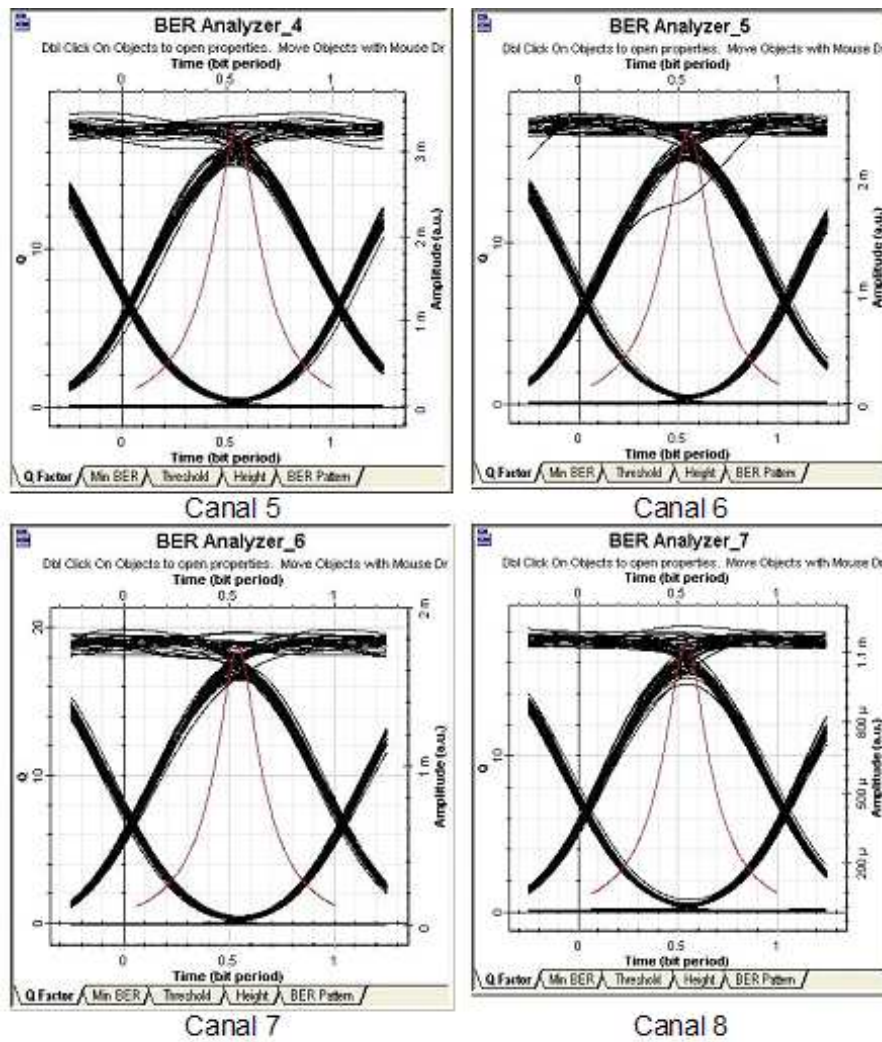


Figura 5.28: Diagrama de olho dos canais de 5 a 8 no final de todo o enlace (672 km) do Tramo-Oeste com amplificador Raman.

Tabela 5.8: Fator Q e BER dos oito canais após enlace de 672 km de fibra com amplificador Raman.

Canal	Comprimento de onda (nm)	Frequência (THz)	Fator Q	BER
1	1552,52	193,1	21,11	$2,27 \times 10^{-99}$
2	1550,92	193,3	18,21	$1,51 \times 10^{-74}$
3	1549,32	193,5	18,42	$2,9 \times 10^{-76}$
4	1547,72	193,7	17,98	$1,02 \times 10^{-72}$
5	1546,11	193,9	17,35	$6,49 \times 10^{-68}$
6	1544,52	194,1	16,95	$6,54 \times 10^{-65}$
7	1542,9	194,3	18,61	$8,75 \times 10^{-78}$
8	1541,34	194,5	17,20	$8,85 \times 10^{-67}$

A Figura 5.29 mostra o espectro dos oito canais ópticos com amplificador Raman na saída do enlace do final.

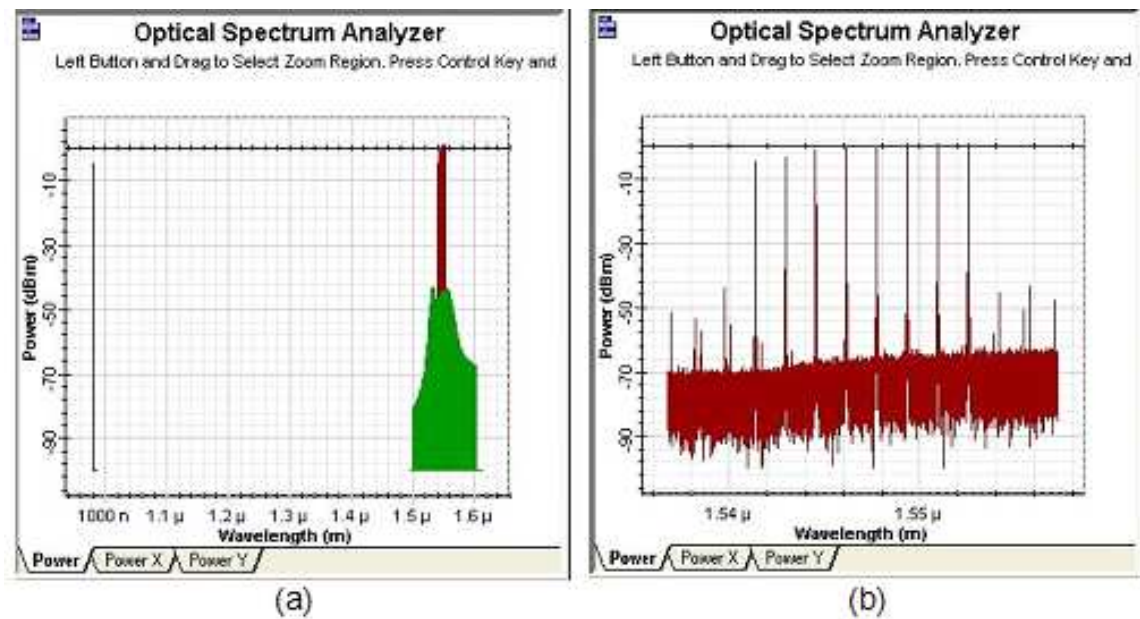


Figura 5.29: Diagrama espectral dos quatro canais ópticos na saída na saída do enlace do 1º trecho. (a) sinal de bombeio (980 nm) e os oito canais em meio ao ruído ASE, (b) oito canais sem o ruído ASE.

Analisando os resultados, na configuração com amplificação utilizando EDFA, só foi possível a transmissão com qualidade em 5 canais. Os canais 5, 7 e 8 apresentaram forte interferência simbólica (ISI), decorrente principalmente do *jitter* temporal, provocado pela alta dispersão acumulada da fibra, pelo acúmulo de ruído ASE dos amplificadores e não-linearidades da fibra.

A configuração com amplificação Raman apresentou melhor desempenho, pois conseguiu transmitir de forma confiável os 8 canais, garantindo a qualidade na transmissão.

Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi apresentado o estudo de um projeto para a implantação de um sistema WDM com amplificação óptica na Eletronorte.

Os sistemas WDM totalmente ópticos estão fundamentados na possibilidade de reduzir os custos da rede minimizando o número de regeneradores nos enlaces ópticos de longa distância. Para que se tenha retorno financeiro certo e no mais curto prazo possível, a transição para um sistema totalmente óptico deve ser realizada de forma segura, requerendo para isto tecnologias sólidas em todos os setores da rede.

Através das simulações, observa-se que ainda não é possível a implantação de um sistema totalmente óptico no enlace do Tramo-Oeste, pois ainda existe a necessidade de regeneração em alguns pontos do sistema.

Nas duas configurações propostas, ambas utilizaram regeneração ao longo do enlace. Porém, na configuração 2, a utilização de amplificadores Raman em conjunto com os amplificadores EDFAs para aumentar as distâncias de transmissão possibilitou a eliminação de uma regeneração entre o trecho Pacajá a Altamira.

Apesar dos amplificadores Raman ainda apresentarem custo elevado no mercado, o seu alto desempenho na qualidade de transmissão relacionado ao EDFA pode ser comprovado através dos resultados das simulações, pois foi possível aumentarmos o número de canais sem comprometer o desempenho do sistema. E quanto mais bits transmitidos por unidade de banda passante (Hz) mais barato o valor do bit para o consumidor final (cliente).

Desta forma, investimentos de grande porte têm que ser estudados para a implementação de um sistema WDM na atual rede da Eletronorte.

Como passos futuros indicam-se o estudo do aumento do número de canais WDM para 12 canais, utilizando amplificador Raman em conjunto com o EDFA; a possibilidade de aumento da capacidade de transmissão de cada canal para 10 Gb/s; estudo de enlaces WDM

com compensação de dispersão e a retirada da repetidora em Pacajá (que eleva o custo de implantação e operação do sistema) através de um pré-projeto com a adição de amplificadores EDFA juntamente com o Raman e outros equipamentos ópticos ao longo do enlace.

Referências Bibliográficas

- [1] Armando Nolasco Pinto. “Análise e Optimização de Sistemas de Comunicação Ópticos Baseados em Solitões”. Tese de doutorado, Universidade de Aveiro, Portugal, 1999.
- [2] Tatiana Medeiros Guasque de Mesquita. “Estatística do Ganho Dependente da Polarização em Sistemas Ópticos com Amplificação RAMAN”, Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2003.
- [3] Faria, José Ewerton e Moschin Edson. “Sistema de comunicações ópticas, apostila CEDETC Inatel, 1995.
- [4] F. Giozza, E. Conforti, H. Waldman. “Fibras Ópticas - Tecnologias e Projeto de Sistemas- Makrons Books. 1991.
- [5] Alberto Campos Pallares. “Redes e sistemas de Telecomunicações”. Brasport. 2001.
- [6] Govind P. Agrawal. “*Applications of Nonlinear Fiber Optics*”. Academic Press. 2001.
- [7] José Antônio Justino Ribeiro. “Comunicações ópticas”. Érica. 2003.
- [8] Govind P. Agrawal. “*Fiber communication Systems*”. John Willey & Sons. Inc. 1997.
- [9] Gerd Keiser. “*Optical Fiber Communications*”. Terceira Edição. McGrawHill International Editions. 2000.
- [10] Lars-Grüner Nielsen etc et al. “Dispersion-Compensating Fibers”. Journal of Lightwave Technology. Vol. 23, N° 11. Novembro 2005.
- [11] Vivek Alwayn, CCIE N° 2995. “Optical Network Design and Implementation”. Cisco Press. 2004.
- [12] C. E. P. Blume, A. Pohl , J. A. Medeiros Neto. “Estimativa do Coeficiente de PMD Máximo em Enlaces de Cabos Ópticos para Telecomunicações”. SBrT2001.
- [13] Huber Bernal Filho. “Redes WDM”. TELECO.2004

-
- [14] Daniel Naves de L. Fortes. “Estudo de Sistemas WDM Incluindo Compensação de Dispersão”. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, 2006.
- [15] Sandra Jorge Barboza e Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi. “Análise de Rede WDM com Amplificação Óptica”. XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações-SBT’04, 06- 09 DE SETEMBRO DE 2004, BELÉM - PA
- [16] M. Yadlowsky, E. Deliso, and V. Silva, “Optical Fibers and Amplifiers for WDM Systems”, *Proceedings of the IEEE* , vol. 85, pp. 1765-1779, November 1997.
- [17] Y. Sun, A. K. Srivastava, J. Zhou e J. Sulhoff, “Optical amplifiers for WDM optical networks”, *Bell Labs. Technical Journal*, pp. 187-206, January-March 1999. [8] : J. P Ryan, “WDM: North America deployment trends”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 2, pp. 40-44, 1998.
- [18] Júlio César Rodrigues Fernandes de Oliveira. “Projeto de EDFAs com Controle Automático de Ganho Totalmente Óptico para Aplicações em Redes WDM”. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2004.
- [19] M. R. X. de Barros e J. B. Rosolem, *Amplificadores Ópticos a Fibra Dopada com Érbio, caderno de treinamento, CPqD - Telecom & IT Solutions, Brasil*, 2000.
- [20] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 2nd. ed., Academic Press, San Diego, CA, 1995.
- [21] G.P Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 1st ed., Ed. New York: J. Wiley&Sons, 1992.
- [22] Manual do software *Optisystem 5.0TM*. *Optiwave Systems Inc.*
- [23] Relatório Final, Projeto: “Aplicação de novas técnicas para expansão da capacidade de comunicação da rede óptica da ELETRONORTE”, Belém, 31 de dezembro de 2005.