



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**EXPANSÃO DA CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO DE SISTEMAS
ÓPTICOS ATRAVÉS DA TECNOLOGIA WDM: UM ESTUDO DE
CASO SOBRE O SISTEMA DA ELETRONORTE.**

GERSON SERRA DE ALMEIDA

DM – 29 / 2011

**UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém - Pará - Brasil
2011**



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**EXPANSÃO DA CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO DE SISTEMAS ÓPTICOS
ATRAVÉS DA TECNOLOGIA WDM: UM ESTUDO DE CASO SOBRE O
SISTEMA DA ELETRONORTE.**

GERSON SERRA DE ALMEIDA

**Dissertação submetida à Banca
Examinadora do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica da
UFPA para obtenção do grau de
MESTRE em Engenharia Elétrica.**

**UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém - Pará - Brasil
09 / 2011**

A447e Almeida, Gerson Serra de

Expansão da capacidade de transmissão de sistemas ópticos através da tecnologia WDM: um estudo de caso sobre o sistema da Eletronorte; A/ Gerson Serra de Almeida; orientador, João Cisóstomo Weyel Albuquerque Costa. - 2011.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós – Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2011.

1. Comunicações ópticas. 2. Multiplexação. 3. Sistemas de energia elétrica – Pará. I. Orientador. II. Título.

CDD 22. ed. 621.3827



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**EXPANSÃO DA CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO DE SISTEMAS ÓPTICOS
ATRAVÉS DA TECNOLOGIA WDM: UM ESTUDO DE CASO SOBRE O
SISTEMA DA ELETRONORTE.**

AUTOR: GERSON SERRA DE ALMEIDA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS –
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRÁU DE MESTRE
EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.**

**APROVADA EM 05 / 09 / 2011.
BANCA EXAMINADORA**

**Profº Dr. João Crisóstomo Weyel de Albuquerque Costa
(ORIENTADOR – UFPA)**

**Profº Dr. Rubem Gonçalves Farias
(MEMBRO – PPGEE / UFPA)**

**Profº Dr. Licinius Dimitri Sá de Alcântara
(MEMBRO – EXTERNO / UFPA)**

EPÍGRAFE

Melhor é o fim das coisas do que o seu princípio.

Eclesiastes 7.8b.

Tudo posso naquele que me fortalece.

Filipenses 4.13

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, não posso deixar de agradecer a Deus Pai, que é o criador de todas as coisas; e por fazer da obediência a Ele o princípio da sabedoria.

Também dou graças ao meu salvador Jesus Cristo, o autor e consumador da minha fé; o Juiz dos juízes, Advogado dos advogados e Engenheiro dos engenheiros; referencial perfeito de justiça, que me conduziu com ânimo e graça durante todo o curso de Mestrado, como também no término deste, porque sem Ele nada se pode fazer.

Ao meu precioso amigo, o Espírito Santo, o meu muito obrigado! Pois com o seu consolo e a sua presença na minha vida, Ele me ajudou a vencer esta etapa tão árdua, debaixo das suas asas de descanso.

À minha esposa Valdinéa Almeida e minhas filhas Ester, Hadassa e Jéssica, pelas orações, intercessões, injeção de ânimo, incentivo, força e coragem, para atingir o alvo, que parecia estar no infinito.

Agradeço ao meu orientador, Prof. / Dr. João Crisóstomo pelo seu apoio e incentivo; e por acreditar na minha perseverança, em eu concretizar o Mestrado.

Agradeço ao Engo e amigo Clenilson, pela sua colaboração, que concorreu para a conclusão do meu Mestrado.

Aos familiares e amigos que de forma direta ou indireta, contribuíram nesta jornada. Incentivando-me a vencer as pressões, cansaços, desânimos, correrias, advindas nesta batalha.

Também não deixo de agradecer as dificuldades, barreiras, todos e tudo que de forma direta ou indireta contribuíram negativamente para me fazer recuar; pois na verdade, serviram de mola propulsora para a minha vitória; pois sempre é avançar, e não recuar, não retroceder.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – FATORES RELEVANTES PARA A EXPANSÃO DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES ÓPTICAS	5
2.1 – Introdução	5
2.2 – Sistema de Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM)	6
2.3 – Sistema de Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda Denso (DWDM)	8
2.4 – Instalação de Sistemas WDM em Sistemas já Existentes	10
2.5 – Amplificadores Ópticos em Sistemas de Comunicações a Fibra Óptica	11
2.5.1 – Amplificador Óptico a Fibra Dopada com Érbio (EDFA)	12
2.5.2 – Amplificador Óptico Raman	17
2.5.2.1 – Características dos Amplificadores Raman	18
2.5.2.2 – Propriedades dos Amplificadores Raman	20
2.6 – Efeitos de Propagação sobre o Sinal em Fibras Ópticas	21
2.6.1 – Efeitos Lineares da Fibra Óptica	22
2.6.1.1 – Atenuação	22
2.6.1.2 – Dispersão Cromática	22
2.6.1.3 – Dispersão por Modo de Polarização (PMD – “ <i>Polarization Mode Dispersion</i> ”)	26
2.6.1.4 – Ruído	27
2.6.2 – Efeitos Não Lineares da Fibra Óptica	27
2.6.2.1 – Espalhamento Raman Estimulado (Stimulated Raman Scattering – SRS)	29
2.6.2.2 – Espalhamento Brillouin Estimulado (Stimulated Brillouin Scattering – SBS)	30
2.6.2.3 – Mistura de Quatro Ondas (Four Wave Mixing – FWM)	30
2.6.2.4 – Instabilidade de Modulação (Modulation Instability – MI)	31

2.6.2.5 – Auto Modulação de Fase (Self Phase Modulation – SPM)	31
2.6.2.6 – Modulação de Fase Cruzada (Cross Fase Modulation – XPM)	32
2.7 – Ferramentas para Análise de Desempenho do Sistema Óptico	32
2.7.1 – Relação Sinal Ruído Óptica (Optical Signal to Noise Ratio – OSNR)	33
2.7.2 – Taxa de Erro de Bit (Bit Error Rate – BER)	33
2.7.3 – Diagrama de Olho	35
2.8 – Técnica de Correção de Erro (Forward Error Correction - FEC)	38
2.8.1 – FEC em Redes de Longa Distância	38
CAPÍTULO 3 – ANÁLISE DO PROJETO DE EXPANSÃO DO BACKBONE ÓPTICO DO CONVÊNIO DE COOPERAÇÃO TÉCNICA ENTRE A ELETRONORTE E O GOVERNO DO ESTADO DO PARÁ	40
3.1 – Introdução	40
3.2 – Concepção do Projeto de Expansão do Sistema	40
3.3 - Dimensionamento do Sistema Óptico	44
3.4 - Implantação de Cabos Ópticos Auto Sustentados em Aproximações Ópticas, entre Sites da Eletronorte e Prodepa (Governo do Pará)	46
3.5 - Resultado das Simulações Realizadas no Sistema Navega Pará: Backbone Óptico DWDM / SDH STM -16	54
3.5.1 - Trecho Marabá – Santa Maria para oito canais DWDM de 10 Gbit/s	55
3.5.2 – Trecho Tucuruí – Rurópolis (Tramo Oeste) para oito canais DWDM de 2,5 Gb/s	58
3.5.3 – Trecho Rurópolis – Itaituba, para cinco canais DWDM de 2,5 Gb/s	63
3.5.4 – Trecho Rurópolis - Santarém para cinco canais DWDM de 2,5 Gb/s	65
3.5.5 – Trecho Belém – Prodepa, para oito canais DWDM de 2,5 Gb/s	67

3.5.6 – Análise dos Resultados das Simulações Realizadas no Sistema Navega Pará	69
CAPÍTULO 4 – NOVA PROPOSTA PARA EXPANSÃO POR WDM, E UTILIZANDO BOMBEIO REMOTO EM AMPLIFICADORES ÓPTICOS. E EFEITO RAMAN.	71
4.1 – Introdução	71
4.2 – Proposta de Mudanças no Sistema Óptico do Tramo Oeste	71
4.3 - Projeto dos Amplificadores Ópticos	72
4.4 – Nova Configuração Adotada	73
4.4.1 – Amplificadores Ópticos com Bombeio Remoto na Transmissão	74
4.4.2 – Amplificadores Ópticos com Bombeio Remoto na Recepção	75
4.5 – Dimensionamento do Sistema Óptico Sem Repetição para o Tramo Oeste	77
4.6 – Especificação dos Amplificadores Ópticos	82
4.7 – Simulações pelo Software de Simulação Optisystem 4.1™	82
4.8 – Projeto do Tramo Oeste com Bombeamento Remoto e Expansão da Capacidade para WDM oito Canais, à Taxa de 2,5 Gb/s	84
4.8.1 - Enlace do Tramo Oeste com Bombeamento Remoto e WDM oito canais a 2,5 Gb/s	85
4.8.2 – Resultados das Simulações para o Tramo Oeste com Bombeamento Remoto e WDM oito Canais a 2,5 Gbit/s	89
4.9 - Desempenho do Sistema WDM oito canais a 2,5 Gbit/s para o Tramo Oeste	91
4.10 – Tecnologias Envolvidas no Sistema Óptico sem Repetição do Tramo Oeste	91
4.10.1 – Fontes de Bombeio	92
4.10.2 - Pós Amplificador e Pré – Amplificador Remotos	93
4.10.3 - Transmissor WDM	94
4.10.3.1 - Características do Transmissor WDM	94
4.10.3.2 - Receptor WDM	94

4.11 - Projeto Marabá - Santa Mmaria com Bombeamento Remoto e Amplificação Raman, com oito canais WDM de 10 gbit/s	94
4.11.1 - Enlace Marabá – Santa Maria com Bombeamento Remoto e Amplificação Raman, com oito canais WDM de 10 Gbit/s	95
4.11.2 – Resultados das Simulações do Trecho Marabá – Santa Maria com Bombeamento Remoto e Amplificação Raman; com oito canais WDM de 10 Gbit/s	99
5 – Conclusão e Propostas para Trabalhos Futuros	105
5.1 - Conclusão	105
5.2 - Propostas para Trabalhos Futuros	110
Referências Bibliográficas	111
Apêndice A	115
A1 – Data Sheet DW – 902. August, 2003. Polarization Beam Combiner. Product Type DW – 902	115
A2 - Data Sheet FOL1405Rxy / 1480nm Pump Laser Module. ODC-2C001D. 1480nm Pump LDM up to 320mW. Date DEC.22.2004	117

LISTA DE FIGURAS

Figura	Legenda	Página
2.1	Sistema WDM	8
2.2	Componentes de um enlace DWDM	9
2.3	Espectro do ganho do erbium doped fiber amplifier	9
2.4	Princípio de funcionamento dos amplificadores ópticos à fibra dopada com érbio	13
2.5	Esquemático ou diagrama básico de um EDFA	15
2.6	Bandas de energia do érbio	15
2.7	Modelo teórico da amplificação Raman	20
2.8	Atenuação óptica	22
2.9	Dispersão óptica	23
2.10	Representação do fenômeno da dispersão intramodal ou de velocidade de grupo (dispersão cromática) em uma fibra óptica	24
2.11	Gráfico da atenuação e dispersão, para os tipos de fibras monomodo	24
2.12	Diagrama de olho de um sinal com interferência intersimbólica	25
2.13	Dispersão de modo de polarização (PMD)	27
2.14	(a) Seqüência de bits e (b) Respectivo diagrama de olho	35
2.15	Principais parâmetros do diagrama de olho	36
3.1	Localidades a serem atendidas pelo backbone óptico	41
3.2	Descrição do sistema backbone óptico com tecnologia DWDM e SDH no Pará	42
3.3	Comunicação óptica entre subestações	47
3.4	Composição do cabo óptico OPGW (Optical Ground Wire)	49
3.5	Aproximação entre a SE da Eletronorte e o site no centro da cidade	50
3.6	Diagrama de interligação das salas de telecomunicações	51

3.7	Tipos de interligações entre os diversos órgãos do Governo	52
3.8	Layout do trecho Marabá – Santa Maria, para oito canais DWDM de 10 Gb/s	56
3.9	Diagramas de olho e BER dos oito canais DWDM a 10 Gbit/s, do trecho Marabá – Santa Maria	58
3.10	Características atuais do sistema óptico do Tramo Oeste	59
3.11	Configuração do sistema de linhas de transmissão do Tramo Oeste	60
3.12	Layout do trecho Tucuruí – Rurópolis (Tramo Oeste), para oito canais DWDM de 2,5 Gb/s	60
3.13	Diagramas de olho e BER dos oito canais DWDM a 2,5 Gbit/s, do trecho Tucuruí – Rurópolis (Tramo Oeste)	62
3.14	Layout do trecho Rurópolis - Itaituba, para cinco canais DWDM de 2,5 Gb/s	63
3.15	Diagramas de olho e BER dos cinco canais DWDM a 2,5 Gbit/s, do trecho Rurópolis – Itaituba	64
3.16	Layout do trecho Rurópolis - Santarém, para cinco canais DWDM de 2,5 Gb/s	65
3.17	Diagramas de olho e BER dos cinco canais DWDM a 2,5 Gbit/s, do trecho Rurópolis – Santarém	66
3.18	Layout do trecho Belém – Prodepa, para oito canais DWDM de 2,5 Gb/s	67
3.19	Diagramas de olho e BER dos oito canais DWDM a 2,5 Gbit/s, do trecho Belém – Prodepa	68
4.1	Ilustração de um sistema óptico sem repetição	73
4.2	Configurações de “post – amplifier” remoto com bombeio: (a) via fibra transmissora e (b) via uma fibra de bombeio dedicada	74
4.3	Topologias típicas do receptor com pré – amplificador bombeado remotamente: (a) Bombeio pela fibra transmissora, (b) Uma fibra dedicada transporta o bombeio ou parte dele, (c) Bombeio remoto bidirecional	76

4.4	Configuração com bombeio co – propagante de simples passagem ou convencional	79
4.5	Diagrama do sistema óptico de transmissão sem repetição para o Tramo Oeste, para oito canais WDM a 2,5 Gbit/s	87
4.6	Diagramas de olho e BER dos oito canais WDM a 2,5 Gbit/s, do sistema Tramo Oeste sem repetição	90
4.7	Arranjo dos quatro lasers ópticos da fonte de bombeio de alta potência	92
4.8	Ilustração de acondicionamento dos pós e pré - amplificadores em caixa de emenda óptica, e instalação nas torres de transmissão	93
4.9	Layout do diagrama sistêmico do enlace Marabá – Santa Maria com Bombeamento Remoto e Amplificação Raman; com oito canais WDM de 10 Gbit/s	99
4.10	Diagramas de olho e BER dos oito canais WDM a 10 Gbit/S, do enlace Marabá – Santa Maria, com Bombeamento Remoto e Amplificação Raman	101

LISTA DE TABELAS

Tabela	Título	Página
2.1	Valores usuais do coeficiente de dispersão cromática para as fibras SSMF, DSF, NZDF e DCF	25
3.1	Atenuações e distâncias entre as localidades	43
3.2	Características do cabo óptico OPGW	48
3.3	Valores de atenuação e distâncias do trecho Marabá – Santa Maria	56
3.4	Valores da BER e OSNR para cada canal na recepção, na saída do demultiplexador, para oito canais de 10 Gbit/s (Marabá – Santa Maria)	57
3.5	Características do cabo óptico OPGW (Optical Ground Wire) do Sistema Tramo Oeste	59
3.6	Valores de atenuação e distâncias do trecho Tucuruí - Rurópolis	61
3.7	Valores da BER e OSNR para cada canal na recepção, na saída do demultiplexador, para oito canais de 2,5 Gbit/s (Tucuruí – Rurópolis: Tramo Oeste)	61
3.8	Valores da BER e OSNR para cada canal na recepção, na saída do demultiplexador, para cinco canais de 2,5 Gbit/s (Rurópolis – Itaituba)	63
3.9	Valores da BER e OSNR para cada canal na recepção, na saída do demultiplexador, para cinco canais de 2,5 Gbit/s (Rurópolis – Santarém).	65
3.10	Valores da BER e OSNR para cada canal na recepção, na saída do demultiplexador, para oito canais de 2,5 Gbit/s (Belém – Prodepa)	67
3.11	Plano de frequências e comprimentos de onda, utilizados no sistema DWDM	70

4.1	Atenuação e distância de cada trecho com valores referentes à nova configuração (sem a repetidora de Pacajá)	88
4.2	Valores das simulações para o Tramo Oeste com Bombeamento Remoto e WDM oito canais a 2,5 Gb/s; de OSNR, Q e BER, para cada canal na recepção, na saída do demultiplexador	89
4.3	Valores de atenuação e comprimento de cada link com a nova configuração	98
4.4	Valores da OSNR e BER para cada canal na recepção, na saída do demultiplexador, para oito canais de 10 Gbit/s (Marabá – Santa Maria)	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Abreviatura	Descrição
APD	Foto diodo de avalanche (Avalanche Photodiode)
ASE	Emissão espontânea amplificada (Amplified Spontaneous Emission)
ATM	Asynchronous transfer mode
BER	Taxa de erro de bit (Bit Error Rate)
CWDM	Coarse wavelength division multiplexing
DCF	Fibra compensadora de dispersão (Dispersion Compensation Fiber)
DCM	Módulo de compensação de dispersão (Dispersion compensation module)
DEMUX	Demultiplexador
DFB	Realimentação distribuída (Distributed Feedback)
DGO	Distribuidor geral óptico
DID	Distribuidor intermediário digital
DRA	Distributed Raman amplification
DSF	Fibra de dispersão deslocada (Dispersion Shifted Fiber)
DWDM	Multiplexação densa por divisão em comprimento de onda (Dense Wavelength Division Multiplexing)
FDE (EDF)	Fibra dopada com érbio (Erbium Doped Fiber)
EDFA	Amplificador óptico à fibra dopada com érbio (Erbium Doped Fiber Amplifier)
EOL	Final da vida útil (End of Life)
ESCON	Enterprise system connection
FDM	Multiplexação por divisão em frequência (Frequency Division Multiplexing)
FEC	Forward error correction
FEC (IB-FEC)	Forward error correction (In Band – FEC)

FEC (OOB-FEC)	Forward error correction (Out of Band – FEC)
FWM/FPM	Mistura de quatro ondas ou de quatro fótons (Four Wave / Photon Mixing)
G.652	(ITU -T) - Characteristics of a single-mode optical fibre and cable
G.692	(ITU -T) - Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers;
G.703	(10/98) - Physical/electrical characteristics of hierarchical digital interfaces
IP	Internet protocol
ISI	Interferência intersimbólica (Intersymbol Interference)
ITU - T	International Telecommunications Union
LAN	Local area network
LH	Longa distância (Long Haul)
LT	Linha de transmissão
MI	Instabilidade de modulação (Modulation Instability – MI)
MUX	Multiplexador
NBR	Norma Brasileira
NRZ	Non return to zero
NZDF	Fibra de dispersão não nula (Non Zero Dispersion Fiber)
OADM	Optical add and drop multiplexer
OD	Optical demultiplexer
OEO	Óptico – elétrico – óptico
OM	Optical multiplexer
OPGW	Optical ground wire
OSNR	Relação sinal-ruído óptica (Optical Signal-to-Noise Ratio)
PDH	Hierarquia digital quase síncrona (Plesynchronous Digital Hierarchy)
PIN	Positive intrinsic negative
PMD	Dispersão de modo de polarização (Polarization Mode Dispersion)
PMF	Fibra de polarização mantida (Polarization maintaining fiber)
PRODEPA	Processamento de dados do Pará

SAN	Storage area network
SBS	Espalhamento Brillouin estimulado (Stimulated Brillouin Scattering)
SDH	Hierarquia digital síncrona (Synchronous Digital Hierarchy)
SE	Subestação
SEDECT	Secretaria de Estado de desenvolvimento ciência e tecnologia
SMF	Single mode or single mode fiber (Fibra de dispersão não deslocada, ou fibra padrão SMF)
SNR	Relação sinal ruído (Signal to noise ratio)
SONET	Rede óptica síncrona (Synchronous Optical Network)
SPM	Automodulação de fase (Self Phase Modulation)
SRS	Espalhamento Raman estimulado (Stimulated Raman Scattering)
STM - N	Synchronous transport mode
SSMF	Fibra monomodo padrão (Standard Single Mode Fiber)
ULH	Ultra longa distância (Ultra Long Haul)
WDM	Multiplexação por divisão em comprimento de onda (Wavelength Division Multiplexing)
WPA	Water peak attenuation
XPM	Modulação de fase cruzada (Cross Phase Modulation)

Símbolo	Descrição
B	Taxa de bit de transmissão
BL	Produto taxa de bit de transmissão – distância do enlace
D	Coeficiente ou parâmetro de dispersão
D	Comprimento da via óptica
E1	Formato de transmissão de dado digital adotado na Europa com capacidade de trafegar 2048 Mbps
E1, E2, E3	Níveis de energia

GaAs	Arsenieto de gálio
I	Intensidade de luz
InGaAs	Arsenieto de índio e gálio (Indium Gallium Arsenide)
L	Comprimento da fibra ou do enlace de transmissão, ou distância entre repetidoras
λ	Comprimento de Onda
OH +	Íons hidroxila
Ps	Potência óptica do sinal
Q	Fator de qualidade
R	Responsividade
$4I_{11/2}$	Banda estável
$4I_{13/2}$	Banda instável
$4I_{15/2}$	Banda meta estável

RESUMO

Esta dissertação de mestrado apresenta dois projetos, sendo um referente ao sistema Tramo Oeste, e o outro ao sistema Pará – Maranhão; relacionado ao trecho Marabá – Santa Maria, com bombeamento remoto e amplificação Raman.

A dissertação trata da expansão da capacidade de transmissão do sistema óptico da Eletronorte, no Tramo Oeste. Atualmente, esse sistema opera à taxa STM1 (155 Mb/s). Também é usada uma nova tecnologia para eliminação de estações repetidoras, através do bombeamento remoto. Essa técnica se fundamenta no uso de amplificadores ópticos bombeados remotamente, por meio das fibras ópticas do cabo *OPGW (Optical Ground Wire)* já instaladas no sistema. Esses amplificadores ópticos são constituídos somente por componentes passivos; e, além disso, podem ser acomodados em caixas de emendas ópticas; as quais são fixadas nas torres das linhas de transmissão do sistema, ao longo do enlace; sendo que as fontes ópticas para a realização do bombeamento remoto são localizadas e alimentadas nas próprias subestações terminais.

A simulação dos sistemas é através de um software comercial de simulação Optisystem 4.1™. Esta dissertação propõe mudanças nos sistemas ópticos para aumentar a capacidade de transmissão por WDM; bombeamento remoto para estações sem repetição, e uso de amplificação Raman. Aborda-se ainda, a concepção de um backbone óptico DWDM, que é um convênio de cooperação técnica entre a Eletronorte e o Governo do Estado do Pará; e os resultados das simulações desse backbone óptico. É feita uma análise crítica comparativa deste, com os projetos dos sistemas ópticos do Tramo Oeste e do sistema Pará – Maranhão; referente ao trecho Marabá – Santa Maria.

Palavras Chave: Amplificadores EDFA e Raman, bombeamento remoto (Sistemas Ópticos sem Repetição), DWDM.

ABSTRACT

This MSC Thesis present two projects: being one referring to Tramo Oeste System and the other to Pará – Maranhão System, relative to link Marabá – Santa Maria, remote pumping and Raman amplification.

The MSC Thesis treats of the expansion of the transmission capacity of Eletronorte optical system, in the Tramo Oeste. Nowadays, this system operate in STM1 (155 Mbit/s) rate. Also it is used a new technology to elimination the repeaters station across remot pumping. This technique is based in use of remotely pumped optical amplifier across optical fibers of the OPGW (Optical Ground Wire) cable already installed in the system. This optics amplifiers are constituted only passives components part , and there add to that, it is can be accommodated in optics correction boxes that are fixed in transmission lines towers of system to the long link being that the pump optics souces to realization of remote pumping are located and also supplied in property terminus substation.

The simulation of the systems it is across of an commercial software of simulation optisystem 4.1 TM . This MSC Thesis dissertation propose changes in the optical systems to increase the transmission capacity across WDM, remote pumping to repeaterless systems and utilization of Raman amplification. It is broached still the conception of a DWDM optical backbone that it is a technique cooperation accord between Eletronorte and Government of Pará State, and the simulations results of these optical backbone. It is done an comparative critical analysis of that with the projects of opticals systems of Tramo Oeste and of the Pará – Maranhão System, relative to the link Marabá – Santa Maria.

Keywords: EDFA and Raman amplifiers, remote pumping (repeaterless optical systems), DWDM.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

O aumento na demanda dos serviços de telecomunicações trouxe um congestionamento e uma saturação dos sistemas que empregavam as faixas de frequência tradicionais, incluindo as frequências de microondas. Isto motivou o emprego de frequências cada vez mais elevadas, onde as portadoras fossem capazes de transportar um número bem maior de conexões simultâneas, através dos sistemas de multiplexação das mensagens.

Com o aumento da globalização, a troca de informações se tornou uma ferramenta fundamental no andamento da economia, de maneira que se observou a necessidade da formação de redes metropolitanas rápidas, flexíveis e confiáveis. Novas aplicações como videoconferência, computação distribuída, educação à distância, telemedicina, voz sobre IP (VoIP), ATM, SONET/SDH, entre outras, se somam às “aplicações convencionais” como o correio eletrônico, transferência de arquivos, etc. Estes serviços são bastante diversificados, com diferentes níveis de complexidade, qualidade de serviço e requisitos funcionais distintos, exigindo uma grande capacidade de banda passante. O WDM é então discutido como um componente crucial para redes ópticas.

A evolução da óptica fez com que novas descobertas e tecnologias fossem implementadas. As fibras ópticas despertaram grande interesse para a modernização das comunicações por suplantarem os sistemas tradicionais e apresentarem outras vantagens. Dentre essas vantagens podemos citar o fato de os cabos de fibras ópticas possuírem uma capacidade de transmissão muito maior do que a dos cabos de cobre, além do fato de não serem tão susceptíveis a interferências. A perda de potência do sinal por quilômetro é muito menor do que os sistemas com cabos coaxiais; guias de onda ou transmissão pelo espaço livre, que significa uma quantidade menor de repetidores para cobertura total do enlace.

Nas transmissões por fibras ópticas as portadoras possuem frequências na faixa de infravermelho, valores da ordem de centenas de Terahertz, fato que permite prever o emprego de elevadíssimas taxas de transmissão, de até milhares de megabits/segundo. Esta propriedade implica em significativo aumento na

quantidade de canais de voz sendo transmitidos simultaneamente. Uma das limitações no número de canais fica por conta da interface eletrônica, necessária para imprimir a modulação e a retirada da informação no ponto de chegada do sinal. A capacidade do sistema óptico pode ser aumentada ainda mais, utilizando-se a técnica da multiplexação por divisão de comprimento de onda. O WDM é um novo sistema que multiplexa múltiplos comprimentos de onda (ou cores de luz) que serão transmitidos através de uma única fibra óptica.

Uma infra-estrutura WDM é projetada para prover uma evolução de rede significativa para provedores de serviços que buscam atender as demandas de capacidade sempre crescentes de seus clientes. O potencial de fornecer capacidade aparentemente ilimitada de transmissão é obviamente uma das maiores vantagens dessa tecnologia. A tecnologia WDM traz vantagens tanto no aspecto técnico quanto no aspecto econômico.

As distâncias continentais e as dificuldades de acesso são as principais barreiras para a inclusão digital no Brasil. Na Amazônia, estas barreiras são quase intransponíveis, tanto em território, quanto nas dificuldades na forma de rios e floresta. Por essas condições, levar internet ao interior de um estado como o Pará requer investimentos diferenciados, não só monetários, como em tecnologia e conhecimento estratégico da região. Estas condições encarecem o processo e como é baixa a densidade demográfica da Amazônia (clientes, consumidores), a relação custo-benefício afasta a iniciativa privada.

A Eletronote e o Governo do Estado do Pará firmaram um convênio de cooperação técnica (Projeto Navega Pará), cujo objetivo é incrementar a infra-estrutura de telecomunicações do Estado do Pará, mediante o compartilhamento da infra-estrutura de telecomunicações sobre fibras ópticas da Eletronorte, em cabo OPGW; o que possibilitará a interligação entre os principais órgãos do Estado. Esta integração criará um ambiente favorável à incorporação de tecnologia e inovação em processos e produtos; aumentará as vantagens competitivas nos planos regional, nacional e internacional; facilitará a implementação de: redes em arranjos produtivos, governança eletrônica, educação à distância e telemedicina. Ainda proporcionará, ações para inclusão

digital da população através da oferta dos mais variados serviços. Por outro lado, a Eletronorte tem interesse em aproveitar a capacidade excedente dos equipamentos eletrônicos adquiridos pelo Estado do Pará, como auxílio à operação e manutenção de seu sistema de transmissão de energia elétrica e ainda prestar serviços de telecomunicações; uma vez que é autorizada pela Anatel a prestar estes serviços a terceiros. O presente convênio abrangerá as seguintes cidades, onde a Eletronorte possui sua rede óptica: Marabá, Jacundá, Tucuruí, Tailândia, Abaetetuba, Belém, Santa Maria do Pará, Pacajá, Altmira, Uruará, Rurópolis. As redes ópticas conectando Santarém, Rurópolis e Itaituba serão também utilizadas para implementação deste projeto. A implantação de uma rede DWDM, em conjunto com equipamentos SDH, irá proporcionar uma variedade de serviços e capacidades de transporte suficientes para atendimento a demanda atual e futura do Governo do Estado do Pará, permitindo um planejamento de ações futuras.

A Eletronorte entrará como parceira no projeto disponibilizando sua infraestrutura de telecomunicação através da sua rede óptica sobre os cabos pára-raios (*OPGW – Optical Fiber Ground Wire*), para interligação dos municípios ao longo do sistema de transmissão de energia. O cabo OPGW é utilizado para comunicação óptica e como cabo para-raios das linhas de transmissão de energia; ele entra no lugar do cabo para raios das linhas de transmissão. Ele possui em seu interior fibras ópticas revestidas por alumínio.

Esta integração entre cabo e linha de transmissão baseia-se em dois conceitos; que é preservar a função do cabo para – raios, e minimizar a intervenção na linha de transmissão existente.

Este trabalho aborda sobre uma nova proposta, que é sobre a expansão da capacidade de transmissão do sistema óptico da Eletronorte por WDM; bombeio remoto (estação sem repetição), e amplificação Raman; e os resultados das simulações realizadas. Trata também da implementação do projeto Navega Pará, e os resultados de simulação referentes a esse projeto. Outra importante mudança refere-se à substituição dos regeneradores eletrônicos por amplificadores ópticos.

São realizadas comparações entre a nova proposta e o projeto Navega Pará, relacionados aos aspectos econômicos, tecnológicos e de desempenho.

Este trabalho foi organizado para abordar os assuntos da seguinte forma: O capítulo 1 refere-se a introdução, o capítulo 2 trata sobre os fatores relevantes para a expansão de sistemas de comunicações ópticas; o capítulo 3 trata sobre o projeto de expansão do backbone óptico através do convênio entre a Eletronorte e o Governo do Estado. O capítulo 4 apresenta a proposta para expansão por WDM, e utilizando bombeio remoto em amplificadores ópticos, com eliminação de estações repetidoras; e efeito Raman.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e as propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 – FATORES RELEVANTES PARA A EXPANSÃO DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES ÓPTICAS

2.1 – Introdução

A faixa de frequência da portadora é uma das características que diferenciam os sistemas de comunicação ópticos dos sistemas de comunicação em radiofrequência. A frequência de uma portadora óptica, em torno de 300 THZ, é bem superior, por exemplo, à frequência de uma portadora em microondas. Assim, a capacidade de transmissão de informações nos sistemas ópticos é muito maior que a dos sistemas em microondas. Esse enorme potencial de capacidade de transmissão é o que impulsiona o desenvolvimento das tecnologias de comunicações ópticas. Um fator de mérito comumente utilizado para sistemas de comunicação é o produto taxa-distância, BL , onde B é a taxa de transmissão e L , a distância entre o transmissor e o receptor (ou entre as estações repetidoras).

A partir da segunda metade do século 20, foi observado que o uso de ondas eletromagnéticas de altíssima frequência (como a luz) para a transmissão de sinais modulados; permitiria um aumento de várias ordens de grandeza no produto BL . Porém, na década de 50 não havia nem uma fonte de luz coerente e nem um meio de transmissão adequado. Dez anos mais tarde o primeiro problema estaria solucionado, a partir da invenção do laser. Novos esforços originados a partir da idéia do confinamento da luz levaram ao surgimento da fibra óptica. Desde então, os sistemas ópticos de comunicação [1] evoluíram através de diversas gerações. O primeiro deles se tornou disponível comercialmente em 1980, operando a 45 Mbit/s com repetidores a cada 10 km.

Apesar de recente, com pouco mais de 20 anos, a tecnologia dos sistemas de comunicações ópticas progrediu rapidamente e já alcançou um alto grau de maturidade, com sistemas de transmissão operando em taxas de mais de 10 Gbit/s e atingindo distâncias transoceânicas.

Vários fatores ou possibilidades tecnológicas são abordados, com o objetivo de se conseguir o maior desempenho possível em expansão de sistemas ópticos. Entre estas tecnologias temos os amplificadores ópticos de potência,

amplificadores de linha e pré-amplificadores, amplificadores remotos, fibras ópticas, sistema WDM e DWDM, e artifícios ópticos e eletrônicos para supressão de efeitos não lineares e correção de erros. Esses fatores, dentre outros, são ferramentas importantes para se conseguir um bom desempenho em expansão de sistemas de comunicação óptico.

2.2 – Sistema de Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM)

Apesar da enorme banda passante e capacidade de canal das fibras ópticas, os circuitos eletrônicos presentes nas interfaces opto-elétricas e nos estágios de processamento dos sinais ainda representam um “gargalo” para taxas de transmissão elevadas. Considerando-se apenas a janela de amplificação do EDFA (1530 a 1565 nm), por exemplo; a banda passante já seria da ordem de 3,75 THz. No entanto, a chamada “barreira eletrônica” ainda está limitada em circuitos operando a 10 ou até mesmo 40 Gbit/s. Além disso, transmissões em altas taxas são penalizadas devido à dispersão do pulso óptico, com conseqüente alargamento temporal dos bits recebidos.

A alternativa encontrada para utilizar a enorme banda passante disponível nas fibras ópticas foi o uso da técnica de multiplexação por divisão em comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing* - WDM). Trata-se, na verdade, de uma técnica análoga à multiplexação por divisão em frequência (*Frequency Division Multiplexing* - FDM), aplicada aos sistemas ópticos, onde vários sinais são transmitidos através do mesmo meio com o uso de diferentes portadoras [2]. Nos sistemas WDM, dois ou mais canais ópticos com comprimentos de onda distintos são combinados através de componentes ópticos passivos (multiplexadores) e em seguida transmitidos por uma única fibra. Na recepção, um dispositivo (demultiplexador) separa cada um dos canais transmitidos; e assim, são criadas, desta forma, várias “fibras virtuais”, cada uma com a capacidade de transportar diferentes sinais (dados, voz, imagens, etc), sendo totalmente transparentes à taxa e ao protocolo de comunicação.

Os primeiros sistemas WDM eram de baixa densidade, multiplexando um pequeno número de canais ópticos. Suas principais aplicações era a duplicação

da capacidade de transmissão das fibras já instaladas, através da transmissão de um canal óptico em 1310 nm; e outro em 1550 nm, por exemplo; bem como viabilizar a transmissão bidirecional de sinais com diferentes comprimentos de onda em uma única fibra. Atualmente os sistemas operam em alta densidade, com 8 ou 16 canais ópticos em média; ou mais, utilizando a técnica de multiplexação densa por divisão em comprimento de onda (*Dense Wavelength Division Multiplexing* - DWDM). O espaçamento entre cada par de canais adjacentes, definido por norma internacional [3], varia de 12,5 a 100 GHz (0,1 a 0,8 nm, aproximadamente). Sistemas DWDM de longa distância amplificados opticamente permitem uma drástica redução de custos com instalação de novas fibras e equipamentos, pois permitem uma melhor ocupação da banda passante disponível nas fibras ópticas já instaladas. A tecnologia WDM possibilita a transmissão de várias portadoras ópticas em uma mesma fibra, cada uma delas carregando determinado fluxo de dados.

A técnica WDM utiliza a banda espectral na região de 1.300 nm e 1.500 nm, que são as duas janelas de comprimento de onda, onde as fibras ópticas possuem perda de sinal muito baixa. Inicialmente, cada janela era usada para transmitir apenas um único sinal digital. O desenvolvimento dos componentes ópticos, como os lasers de realimentação distribuída (DFB), os amplificadores de fibras dopadas com érbio (EDFAS), os amplificadores Raman, os fotodetectores e os filtros ópticos; permitiu a utilização de cada janela para a transmissão de vários sinais ópticos; cada um ocupando uma pequena fração da janela total disponível.

Os sistemas WDM evoluíram para as tecnologias DWDM e CWDM. O DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) refere-se a sistemas que utilizam espaçamento entre os canais ou comprimentos de onda, de 200 GHz (1,6 nm); 100 GHz (0,8 nm); 50 GHz (0,4 nm), podendo chegar a 25 GHz (0,2 nm). O CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*) refere-se a sistemas mais baratos que utilizam espaçamentos maiores entre os comprimentos de onda, onde a distância entre os canais ou comprimentos de onda, é 20 nm (3000 GHz). O WDM é a reunião de diversos comprimentos de onda em uma mesma fibra, conforme mostra a figura 2.1.



Figura 2.1 – Sistema WDM.

2.3 - Sistema de Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda Denso (DWDM)

O DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*, ou seja, Multiplexação Densa por Divisão em Comprimento de Onda), é o processo de transmissão de diferentes comprimentos de onda sobre uma fibra; e é um revolucionário desenvolvimento do WDM. O desenvolvimento de amplificadores ópticos que operam a 1550 nm, junto com a mais baixa perda daquela janela, proporcionou o desenvolvimento do sistema DWDM; que é baseado no uso de componentes chamados *optical multiplexer* (OM) e *optical demultiplexer* (OD), onde a função do OM é combinar os diferentes comprimentos de onda em um único caminho, e o OD separá-los. O DWDM combina múltiplos sinais ópticos de forma que eles possam ser ampliados como um grupo, e possam ser transportados sobre uma única fibra, aumentando sua capacidade. Cada sinal transmitido pode estar em uma taxa diferente (STM1/STM4/STM16 etc) e em um formato diferente (SONET, SDH, ATM, dados, etc). Um sistema DWDM facilmente pode alcançar capacidades de mais de 40 Gbps, enquanto mantém o mesmo grau de desempenho, confiabilidade, e robustez; ou até mesmo ultrapassando isso, utilizando o mesmo sistema de transporte. O DWDM é a chave tecnológica para integração das redes de dados, voz e imagem de altíssima capacidade.

Além de aumentar a capacidade disponível exponencialmente em fibra embutida, o DWDM tem a vantagem de não precisar de equipamentos finais, para

serem implementados. Assim, são colocados lasers de DWDM, transponders, amplificadores, multiplexers de add/drop, e filtros entre engrenagem de transmissão existente, e em cima de arquiteturas de rede existentes. Uma coisa que torna o DWDM um sucesso é que esta tecnologia obedece ao padrão de fibra G.652 (monomodo) que é utilizado na maioria dos backbones de fibra óptica. Os sistemas DWDM têm taxa de bit e formatos independentes, e podem aceitar qualquer combinação de taxas de interface; como por exemplo, o síncrono, assíncrono, STM1, STM4, STM16, ou STM64, na mesma fibra e ao mesmo tempo. A Figura 2.2, mostra os componentes de um enlace DWDM.

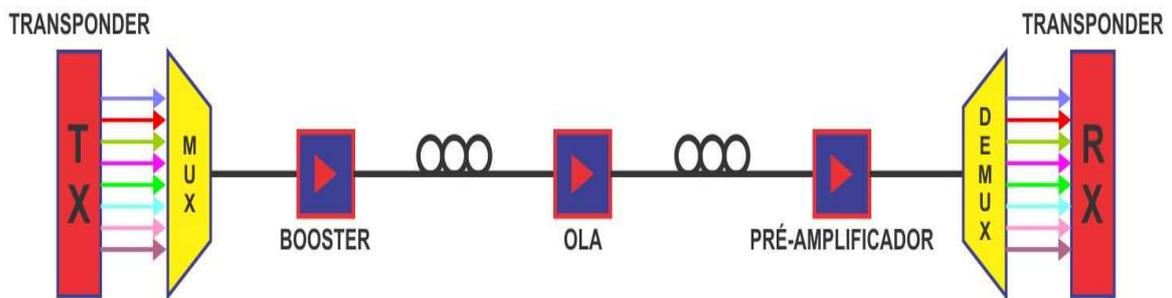


Figura 2.2 - Componente de um enlace DWDM.

A Figura 2.3 mostra que a quantidade de canais em um sistema DWDM depende da largura da região plana do amplificador.



Figura 2.3 – Espectro do Ganho do Erbium Doped Fiber Amplifier.

A maioria dos sistemas comerciais, dispõem de equipamentos para a monitoração da qualidade do sinal óptico. O processo de monitoração utiliza um

sinal óptico piloto em 1510 nm (ITU-T) com uma modulação de 2 Mbits/s, que pode ser utilizado também como canal de serviço. Entretanto, a garantia de qualidade em termo de BER, somente é possível de ser monitorado pelos equipamentos digitais que sobre eles trafegam.

O DWDM é uma tecnologia que pode combinar dezenas de canais em uma única fibra; economizando fibras e equipamentos de transmissão. Os espaçamentos entre os canais podem ser de 200 GHz (1.6 nm), 100 GHz (0,8 nm), 50 GHz (0,4 nm); podendo chegar a 25 GHz (0,2 nm). Os sistemas DWDM utilizam comprimentos de onda entre aproximadamente 1500 nm e 1600 nm e apresentam alta capacidade de transmissão por canal, podendo alcançar 1 Tbit/s na transmissão de dados sobre uma fibra óptica. Dentro das janelas de transmissão, a ITU-T define em sua recomendação G.692 [4] o espectro de utilização para a tecnologia DWDM. Na verdade, não os comprimentos de onda, mas as frequências foram definidas.

2.4 – Instalação de Sistema WDM em Sistemas já Existentes

O WDM pode ser introduzido em sistemas já existentes [5] de modo a aumentar a capacidade de transmissão destes. Para isso, uma seqüência de passos deve ser seguida para assegurar uma perfeita integração:

- Ter uma visão geral do tráfego que é transmitido pela rota, definindo se ele é PDH, SDH ou ATM e suas respectivas taxas de bit.
- Ter uma visão da infra-estrutura existente, com a definição com cabo óptico (atenuação e dispersão), comprimentos dos enlaces e pontos de regeneração;
- Definir a capacidade final de transporte do sistema;
- Ter uma visão das interfaces ópticas disponíveis no equipamento terminal;
- Definir os equipamentos com os dados coletados anteriormente, será possível definir a necessidade de uso de transponders, módulos de compensação e o número de regeneradores e/ou amplificadores;

- Instalação e migração do tráfego para novos sistemas. A instalação causa uma interrupção do tráfego. É possível evitar a interrupção de tráfego, utilizando proteções SDH já existentes.

2.5 – Amplificadores Ópticos em Sistemas de Comunicações a Fibra Óptica

A maneira convencional de compensar perdas inerentes à propagação de sinais ópticos em enlaces a fibra tem sido através do uso de regeneradores eletrônicos. O processo de regeneração inclui a conversão fotoelétrica do sinal, sua amplificação, além da sua re-sincronização e remodelagem dos pulsos antes da reconversão fotônica da informação para o interior da fibra. Em muitas aplicações a amplificação direta do sinal luminoso é extremamente vantajosa. Amplificadores fotônicos podem ser utilizados em qualquer sistema de transmissão limitado por perda, ou seja, naqueles sistemas cuja dispersão promovida pela propagação na fibra não constitui o fator limitante da capacidade de transmissão do enlace.

Os amplificadores ópticos, também chamados fotônicos, vêm causando uma mudança de paradigma na arquitetura dos sistemas ópticos, substituindo com muitas vantagens e algumas desvantagens os repetidores regenerativos. Como vantagens, poderíamos citar: larga faixa óptica possibilitando a operação em múltiplos comprimentos de onda; alto valor de ganho; baixo valor de figura de ruído, permitindo o cascadeamento e operação como preamplificador; alto valor de potência de saturação, indicado para elevar o valor da potência de transmissão ou para compensação de perdas por divisão de potência em redes ópticas. Como desvantagem clara, o amplificador óptico não regenera o sinal. Portanto, o limitante da dispersão continua existindo nos enlaces com amplificação fotônica.

O amplificador óptico é um dispositivo que amplifica diretamente o sinal óptico sem a necessidade de conversão OEO. A luz é diretamente amplificada, e como o sinal óptico é amplificado sem a conversão OEO, ocorre a diminuição da probabilidade de erro. A amplificação óptica não é dependente da velocidade ou do formato do código de transmissão. Em um sistema WDM, o amplificador óptico amplifica todos os comprimentos de onda, permitindo a construção de sistemas

WDM. Desta forma, os amplificadores ópticos responsáveis pela amplificação direta da luz, permitem a expansão dos comprimentos das fibras entre a fonte dos dados e o destino.

Nos primeiros sistemas instalados para viabilizar comunicações ópticas a longas distâncias, diversos regeneradores eletrônicos eram utilizados ao longo do enlace para compensar perdas e distorções durante a propagação dos sinais ópticos pela fibra, como resultado de diferentes fenômenos ou efeitos lineares e não lineares. Em cada regenerador os sinais ópticos eram convertidos em sinais elétricos, amplificados, novamente convertidos em sinais ópticos e retransmitidos. A taxa de transmissão e o formato de modulação deveriam ser compatíveis com o regenerador utilizado.

Como já mencionado, o amplificador óptico, ao contrário dos regeneradores eletrônicos, opera de forma independente da taxa de transmissão e do formato de modulação utilizado; e, além disso, permite a amplificação de diversos comprimentos de onda simultaneamente, o que intensificou o desenvolvimento dos sistemas de transmissão óptica multicanais.

Os dois tipos de amplificadores em uso, e abordados neste trabalho são os amplificadores a fibra dopada com érbio – EDFA (*“Erbium Doped Fiber Amplifier”*), e os amplificadores Raman.

2.5.1 - Amplificador Óptico a Fibra Dopada com Érbio (EDFA)

O amplificador óptico à fibra dopada com érbio (*Erbium Doped Fiber Amplifier* - EDFA) é o mais utilizado em sistemas de comunicação, e tem como componente ativo, um segmento de fibra óptica dopada com o elemento químico érbio, membro da família das terras raras [6]. O sinal óptico a ser amplificado, juntamente com um feixe contínuo de energia proveniente de um “laser de bombeio”, é injetado no segmento de fibra dopada por meio de um acoplador óptico apropriado. Para um bombeio em 980 nm, a amplificação óptica ocorre conforme o mecanismo descrito a seguir: os fótons provenientes do laser de bombeio, ao atravessarem a fibra dopada, transferem energia para os íons de érbio, excitando-os e levando-os a um estado energético mais alto (estado excitado), porém instável. Nestes íons de alta

energia, os elétrons decaem rapidamente e passam para um estado de estabilidade intermediário (estado metaestável), sem emissão de luz. Então, a partir deste estado intermediário eles poderão: 1) Ser excitados novamente por outros fótons de bombeio e subir para níveis de energia ainda maiores, de onde podem decair com ou sem emissão de luz; 2) Transferir sua energia para outro íon de mesmo nível energético e decair para o estado estável; 3) Decair espontaneamente para o estado estável, com a consequente emissão de um fóton por íon, os quais podem ou não se propagar na mesma direção dos fótons do sinal óptico que também se propaga pela fibra. Devido o fato destes fótons serem amplificados durante seu trajeto; o fenômeno descrito é chamado de emissão espontânea amplificada (*Amplified Spontaneous Emission - ASE*) e caracteriza-se em uma forma de ruído; 4) Ser estimulados por um fóton do sinal óptico de forma que, ao decaírem ao estado estável, emitam fótons similares aos que os estimularam. Neste último caso ocorre a amplificação óptica do sinal. A Figura 2.4 ilustra o processo.

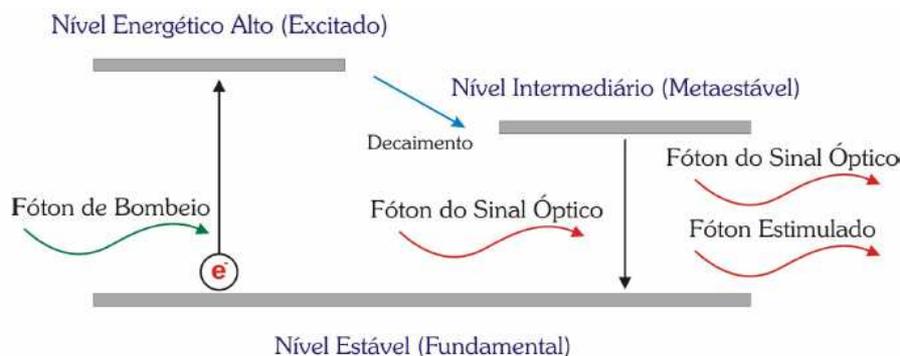


Figura 2.4 - Princípio de funcionamento dos amplificadores ópticos à fibra dopada com érbio.

Entre as principais vantagens de utilização dos amplificadores ópticos, destacam-se:

- Elevada largura de banda elétrica.
- Elevada largura de banda óptica.
- Transparência à taxa e ao formato de transmissão.

- . Operação com vários comprimentos de onda.

Em contrapartida, existem duas desvantagens de grande impacto no sistema.

- Adição de ruído (ASE).
- . Não regeneração do perfil temporal ou do formato do sinal.

O nível de ruído óptico pode ser caracterizado pela relação sinal ruído óptico (*Optical Signal to Noise Ratio* - OSNR) definida por:

$$OSNR = 10 \log \left(\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{ASE}}} \right) \quad (3.1)$$

onde, P_{Signal} representa a potência do sinal na saída do amplificador, e P_{ASE} representa a potência do ruído ASE, medida em uma certa largura de banda de referência.

Os EDFAs são os amplificadores mais importantes, e são de baixo custo, alta eficiência e baixo ruído. Atualmente, existe uma grande classe de amplificadores ópticos baseados nos mesmos princípios do EDFA. Alguns fenômenos físicos da óptica não-linear também são utilizados para promover a amplificação fotônica em fibras; como a emissão estimulada de Raman e Brillouin [7]. Os EDFAs possuem as seguintes vantagens: alta eficiência na transferência de potência do amplificador para o sinal; amplificação direta e simultânea de uma grande região de comprimentos de onda; saturação de saída maior que 1 mW; longo tempo de ganho constante; larga faixa dinâmica; baixa figura de ruído; independência de polarização; e é adequado para aplicações em longa distância. As suas desvantagens são: emissão espontânea de luz amplificada, cross-talk e saturação de ganho. Apesar do dispositivo, ser alimentado por energia elétrica, a amplificação do sinal é totalmente óptica. O princípio do esquema básico de um amplificador óptico com fibra dopada (EDFA), é mostrado na Figura 2.5.

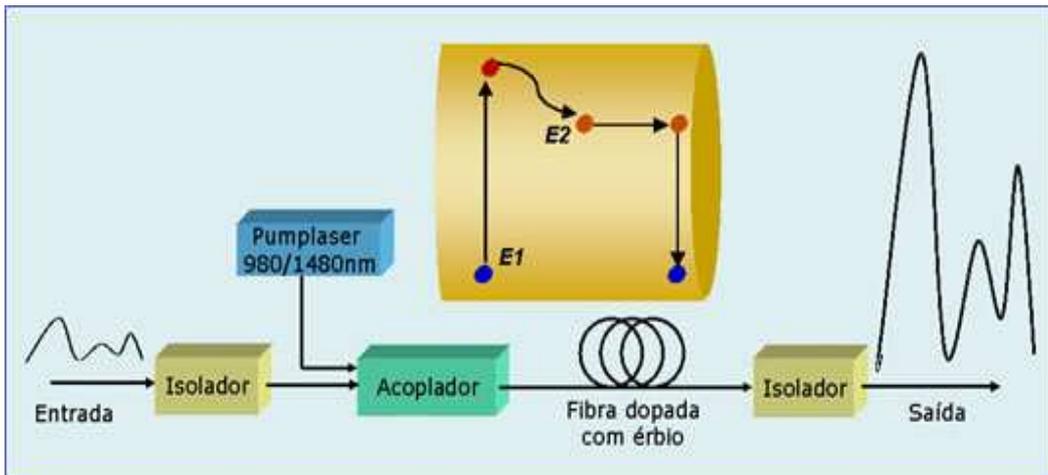


Figura 2.5 - Esquemático ou diagrama básico de um EDFA.

Na Figura 2.6 notamos que o bombeio pode ser feito com alguns comprimentos de onda. Vamos nos restringir a 980 e 1480 nm, pois são os que apresentam a maior eficiência de bombeio; isto é, maior relação ganho apresentado por potência de bombeio.

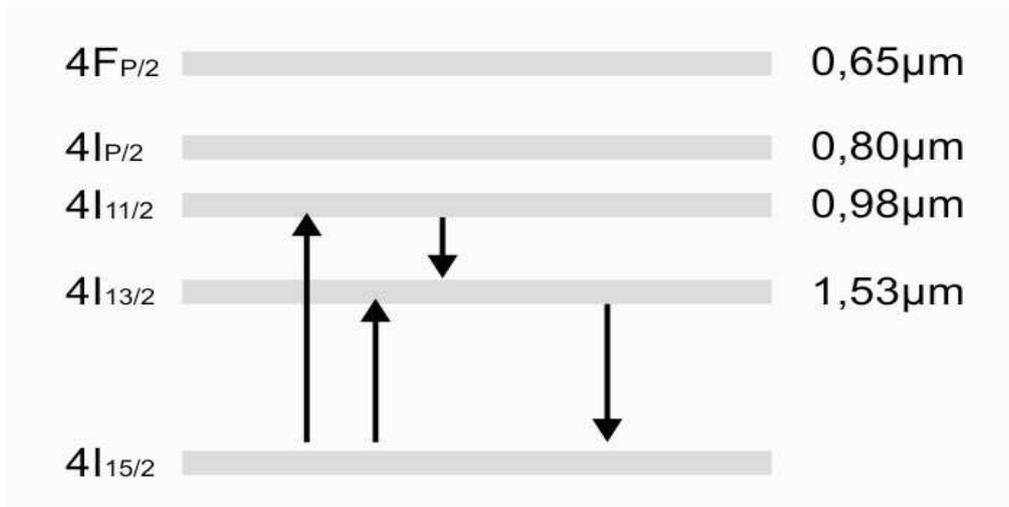


Figura 2.6 - Bandas de energia do érbio [10].

Pelo processo de absorção, os elétrons recebem energia e migram para estados mais energéticos. No caso do uso de 980 nm, os elétrons saem da banda estável $4I_{15/2}$ para a banda instável $4I_{11/2}$ decaindo rapidamente (1μ s) para a banda meta-estável $4I_{13/2}$. Este estado é chamado de meta-estável, pois o tempo de vida do elétron é longo (10 ms) quando comparado com o tempo de vida dos

estados superiores. Conseqüentemente, há inversão de população, fenômeno essencial para a amplificação fotônica. É importante lembrar que os elétrons também decairão espontaneamente; ou seja, sem a presença de fótons de sinal, gerando emissões espontâneas que serão amplificadas ao longo do comprimento da fibra dopada.

Outra opção de bombeio é o comprimento de onda de 1480 nm. Neste caso, os elétrons são conduzidos diretamente à banda meta-estável. Intuitivamente já podemos antever uma dificuldade quando utilizamos o bombeio de 1480 nm: a proximidade com a faixa que deve ser amplificada (1525 - 1560 nm). Outras desvantagens: baixa inversão de população resultando em menor eficiência de bombeio (quase metade do valor obtido com 980 nm) e maior fator de emissão espontânea. Porém há uma vantagem do bombeio em 1480 nm; pode ser feito remotamente pela ponta transmissora ou receptora. Constitui-se, assim, uma possibilidade topológica interessante, pois este comprimento de onda está situado na região de baixas perdas da fibra, solucionando um problema grave de disponibilidade de energia elétrica nos pontos onde o amplificador óptico é inserido [8].

O acoplador WDM agrega na mesma fibra, o sinal e o bombeio. A função do isolador é impedir o retorno ao amplificador, do retroespalhamento Rayleigh e as reflexões de Fresnel (descasamento de índices de refração); o que poderia propiciar oscilações do amplificador, pois trabalhamos com altos valores de ganho.

Nas fibras dopadas temos alta eficiência de bombeio; como por exemplo, ganhos da ordem de 20 dB com potência de bombeio menor que 5 mW. Porém, valores na ordem de 10 a 100 mW são necessários para possibilitar uma potência de saturação adequada. Além de melhor eficiência de bombeio, o laser em 980 nm (InGaAs, GaAs para poços quânticos) requer menor injeção de corrente e menor refrigeração. Isto conduz a uma maior confiabilidade; principal característica para o laser de bombeio, pois ele deve fornecer altos valores de potência por um tempo longo e em regime contínuo.

Eventualmente, filtros ópticos podem ser utilizados dentro do próprio amplificador para limitar a banda e evitar sua saturação com a própria emissão

espontânea. Isoladores garantem a estabilidade para altos ganhos, evitando a realimentação. Os valores de atenuação apresentados pelos isoladores estão por volta de 35 dB para sinais refletidos e apenas 1 dB de perda por inserção.

A banda de amplificação para o EDFA é de cerca de 40 nm [9] [10] [11]. Porém, a União Internacional de Telecomunicações (International Telecommunications Union – ITU) adota para sistemas WDM, uma faixa útil de amplificação de 34 nm; cobrindo comprimentos de onda que vão de 1.530 a 1.565 nm [9]. Dentro desta faixa, pode-se alocar até 43 canais multiplexados em comprimento de onda, separados nominalmente de 100 GHz (espaçamento em comprimento de onda de, aproximadamente 0,8 nm), com frequência central nominal de 193,1 THz (1.552,52 nm). Se, por exemplo, cada um destes canais for modulado a uma taxa de 10 Gbps, uma taxa agregada de 430 Gbps poderá trafegar em uma única fibra óptica [9] [10].

2.5.2 - Amplificador Óptico Raman

Os amplificadores Raman [12] são usados principalmente para sistemas de longa distância, conhecidos como L.H (Long Haul) que geralmente possuem enlaces com extensões da ordem de 300 Km a 800 Km e também para sistemas de ultra longa distância, U. L. H. (Ultra Long Haul), com enlaces acima de 800 Km. Hoje, a aplicação dos amplificadores Raman, é em todos os tipos de redes ópticas, sendo talvez a única exceção, as redes ópticas de acesso, somada as seguintes características abaixo:

- Possibilidade de operação em qualquer faixa suportada pelas fibras ópticas, inclusive as de nova geração que, não sofrem a chamada atenuação por íons oxidrila *.
- O surgimento no mercado de lasers de bombeamento (também chamados de lasers de bombeio) com potências extremamente elevadas, operando praticamente em qualquer frequência, com custos, cada vez menores;
- A utilização em sistemas ópticos novos ou já implantados, em conjunto com os EDFAs (Erbium Doped Fiber Amplifiers), constituindo os chamados amplificadores híbridos.

- A introdução comercial de fibras ópticas de diâmetro reduzido que, com perdas extremamente baixas e outras propriedades, que propiciam a construção de amplificadores Raman cada vez melhores, e de menores dimensões.
- O uso de amplificação Raman distribuída, conhecida como DRA (em Inglês: *Distributed Raman Amplification*);

Hoje, a amplificação por efeito Raman, é uma das mais promissoras tecnologias no ramo das telecomunicações ópticas.

* Embora chamado por muitos de atenuação por pico de água (em Inglês: *Water Peak Attenuation*, abreviado como: WPA), esta denominação é incorreta, pois são os Íons Oxidril (OH⁺), que provocam esta atenuação e, não a água. Portanto, a denominação correta, a ser empregada, é atenuação por absorções extrínsecas dos materiais, pelos íons oxidril (OH⁺) ou, mais simplesmente; atenuação por íons oxidril ou então, atenuação por pico OH (Oxidril).

2.5.2.1 – Características dos Amplificadores Raman

- Espalhamento de Raman

De uma maneira simplificada e dirigida para as telecomunicações, descreve-se o fenômeno do espalhamento de Raman (em Inglês: *Raman Scattering*); a que ocorre quando radiações luminosas interagem com as vibrações dos átomos dos elementos constituintes da fibra óptica.

Estes átomos absorvem as radiações luminosas, e rapidamente as re-emitem na forma de fótons. A energia vibracional dos referidos átomos; dependendo do caso, propicia um aumento ou inflige uma diminuição dos níveis de energia, que estes fótons originariamente possuíam.

- Espalhamento Estimulado de Raman

Define-se como espalhamento estimulado de Raman (em Inglês: *Stimulated Raman Scattering*), quando a energia vibracional dos referidos átomos dos elementos constituintes da fibra óptica propicia um estímulo, que resulta em acréscimo dos níveis de energia, que estes fótons originariamente possuíam.

- Efeitos

O espalhamento estimulado de Raman apresenta vários efeitos de ordem prática, dos quais podemos citar:

1. Como se propaga em ambas as direções de uma fibra óptica, o espalhamento Raman pode vir a ocasionar modulação cruzada.
2. Pode deslocar efeitos não lineares, tais como a mistura de quatro ondas (em Inglês: *Four Wave Mixing*); modulação de fase cruzada (em Inglês: *Cross Phase Modulation*); auto - modulação de fase (em Inglês: *Self Phase Modulation*); e outros, para fora da faixa de passagem do amplificador.
3. Pode ainda ocasionar o "roubo" de energia, de um determinado comprimento de onda, e transferir esta energia, para outro comprimento de onda. Apesar deste efeito, ser aparentemente indesejável, ele pode; e é usado como meio para amplificar sinais ópticos fracos.

- Amplificação por efeito Raman

O fenômeno da amplificação por efeito Raman ocorre, quando os fótons, provenientes de uma fonte de bombeio que possuem níveis elevados de energia, interagem com as vibrações dos átomos da fibra óptica; e ao encontrar com os

fótons do sinal óptico que se propagava na fibra, estes são estimulados, e o seu nível de energia é aumentado.

- Modelo Teórico

A Figura 2.7 apresenta um modelo teórico para fins didáticos, de como se processa a amplificação por efeito Raman.

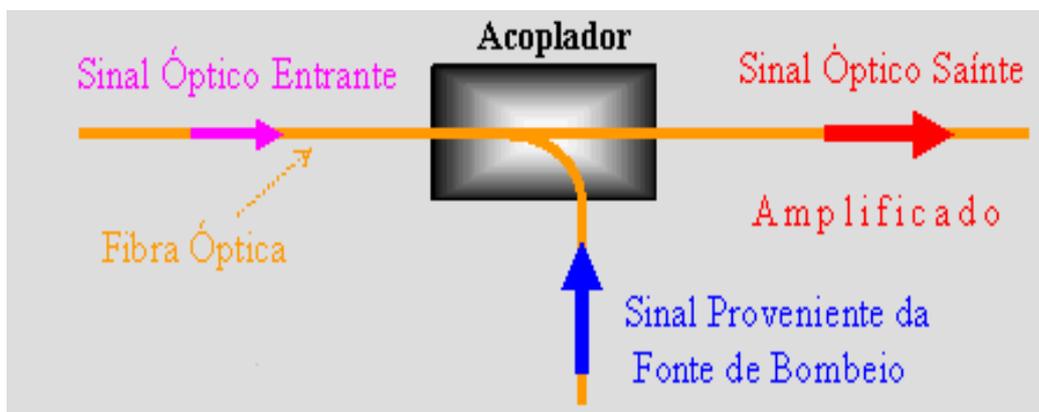


Figura 2.7 - Modelo teórico da amplificação Raman.

2.5.2.2 - Propriedades dos Amplificadores Raman

Os amplificadores Raman apresentam as seguintes propriedades:

- A amplificação por efeito Raman pode ser indistintamente usada em todas as fibras ópticas até hoje instaladas nas redes de telecomunicações.
- O ganho dentro do espectro fotônico, pode ser ajustado ou adequado, pela injeção de lasers de bombeio, operando em diversos comprimentos de onda;
- O ganho acima descrito, ao contrário de outros tipos de amplificadores ópticos, não é vinculado a uma ou duas regiões do espectro fotônico. Os amplificadores Raman permitem curvas características com regiões lineares que permitem ganho para comprimentos de onda desde 300nm até 2.000 nm.

2.6 - Efeitos de Propagação sobre o Sinal em Fibras Ópticas

O estudo da fibra óptica é importante para o entendimento das limitações do enlace óptico com relação à perda de potência e à dispersão. Durante sua propagação pela fibra, os sinais ópticos estão sujeitos a diferentes efeitos lineares e não lineares que provocam sua degradação, comprometendo então o desempenho de transmissão do sistema de comunicação à fibra óptica [13] [14]. Entre os efeitos lineares, destacam-se:

- Atenuação.
- Dispersão cromática (Dispersão intramodal na fibra monomodo).
- PMD
- Ruído.

A atenuação e a dispersão conjugam-se limitando o desempenho dos sistemas ópticos pela degradação do sinal propagante; a primeira afeta a intensidade do sinal e a segunda espalha temporalmente a energia do pulso. Os dois fenômenos dificultam o processo de decisão quando o sinal chega ao receptor, contribuindo para o aparecimento de erros no processo de transmissão digital de informações por fibras ópticas.

A resposta de qualquer dielétrico à luz se torna não linear na presença de campos eletromagnéticos intensos. Isto inclui as fibras ópticas, quando os sinais injetados são de alta potência. A área do feixe óptico na fibra e o comprimento que ele percorre também determinam a ocorrência de fenômenos não lineares que deterioram o sinal óptico, e que são mais relevantes em sistemas multicanais. Os fenômenos ou efeitos não lineares são:

- Espalhamento Raman Estimulado (Stimulated Raman Scattering - SRS);
- Espalhamento Brillouin Estimulado (Stimulated Brillouin Scattering - SBS);
- Mistura de Quatro Ondas (Four Wave Mixing - FWM);
- Instabilidade de Modulação (Modulation Instability - MI);

- Automodulação de Fase (Self Phase Modulation - SPM);
- Modulação de Fase Cruzada (Cross Phase Modulation - XPM).

2.6.1 - Efeitos Lineares da Fibra Óptica

2.6.1.1 - Atenuação

A atenuação [1] [15] [16] representa a perda de potência óptica dentro da fibra, do ponto de transmissão até o ponto de recepção do sinal óptico. O primeiro dado importante sobre atenuação na fibra, é que ela depende do comprimento de onda utilizado, pois a atenuação total apresentada pela fibra é resultado de vários fenômenos físicos que ocorrem na estrutura do material da fibra. A Figura 2.8 mostra o exemplo para a fibra *Standard Single Mode Fiber - SSMF (G.652)*:

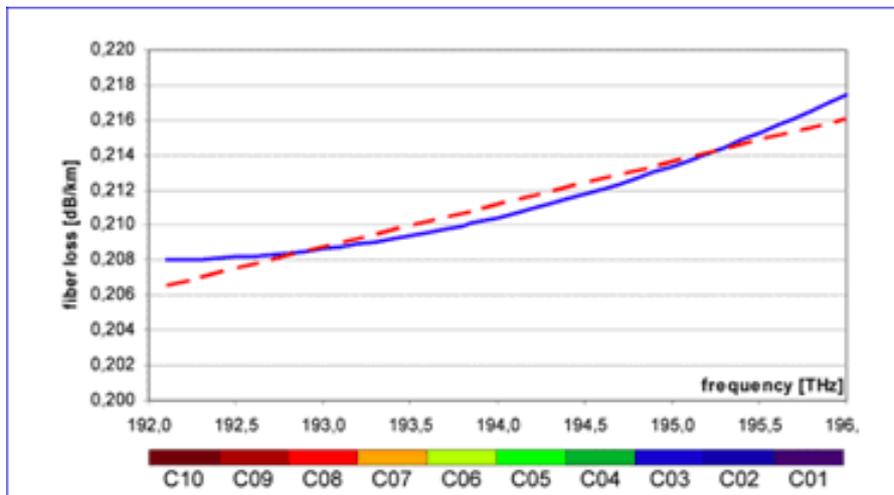


Figura 2.8 – Atenuação óptica.

Um pulso óptico tem sua potência atenuada ao se propagar pela fibra, devido principalmente a absorção material e o espalhamento Rayleigh; que são os dois principais mecanismos de perda nas fibras ópticas (ambos dependentes do comprimento da onda eletromagnética que se propaga); e também da radiação.

2.6.1.2 – Dispersão Cromática

Outro fator importante à ser considerado na transmissão de pulsos de luz por fibras ópticas; é a dispersão cromática [1] [15]] que é baseada no fato de que

diferentes comprimentos de onda viajam em diferentes velocidades no interior da fibra. Como consequência torna-se mais difícil distinguir um pulso recebido como sendo “1” ou “0”. Este efeito é chamado de interferência intersimbólica (*Inter-Symbol-Interference* - ISI). A dispersão é medida em ps/nm e o coeficiente de dispersão de uma fibra é medido em ps/nm-km (pico segundo por nanômetro por quilômetro). É o fator mais relevante para sistemas a fibra óptica monomodo com altas taxas de transmissão; fenômeno cujo resultado caracteriza-se por um alargamento temporal do pulso originalmente transmitido pela fibra óptica; conforme Figura 2.9 abaixo.

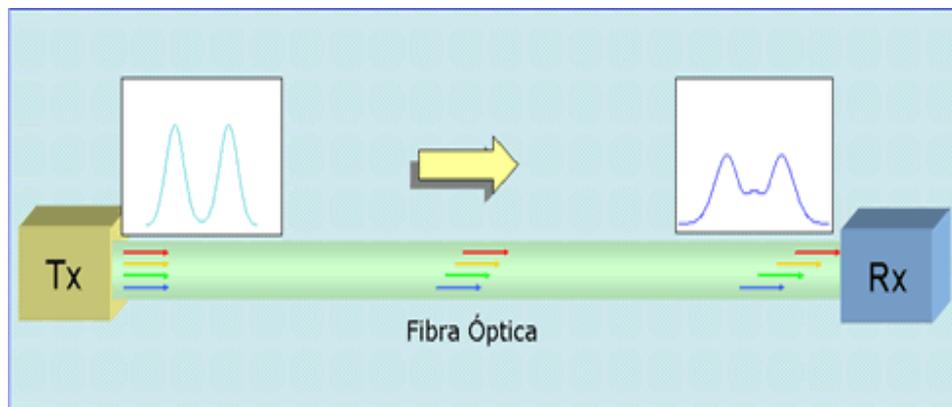


Figura 2.9 - Dispersão óptica.

Na dispersão intermodal ou multicaminho, exclusiva das fibras multimodo, cada raio de luz se propaga em um caminho (modo) diferente. Mesmo mantendo a mesma velocidade e sendo coincidentes no início da transmissão, cada raio de luz atinge o fim da fibra em instantes diferentes, pois os trajetos efetivos percorridos são diferentes. Nas fibras monomodo, atualmente utilizadas para telecomunicações, há apenas um modo de propagação e, portanto, o fenômeno descrito acima não ocorre. Porém, mesmo neste caso ainda ocorre um alargamento temporal do pulso transmitido, resultante da dispersão intramodal ou dispersão de velocidade de grupo. Os diferentes componentes espectrais do pulso óptico se propagam na fibra com velocidades de grupo relativamente diferentes, devido à sua dependência em relação ao índice de refração. A Figura 2.10 também ilustra este fenômeno, também conhecido como dispersão cromática; e a Figura 2.11 mostra o gráfico da atenuação e dispersão, para os tipos de fibras

monomodo.

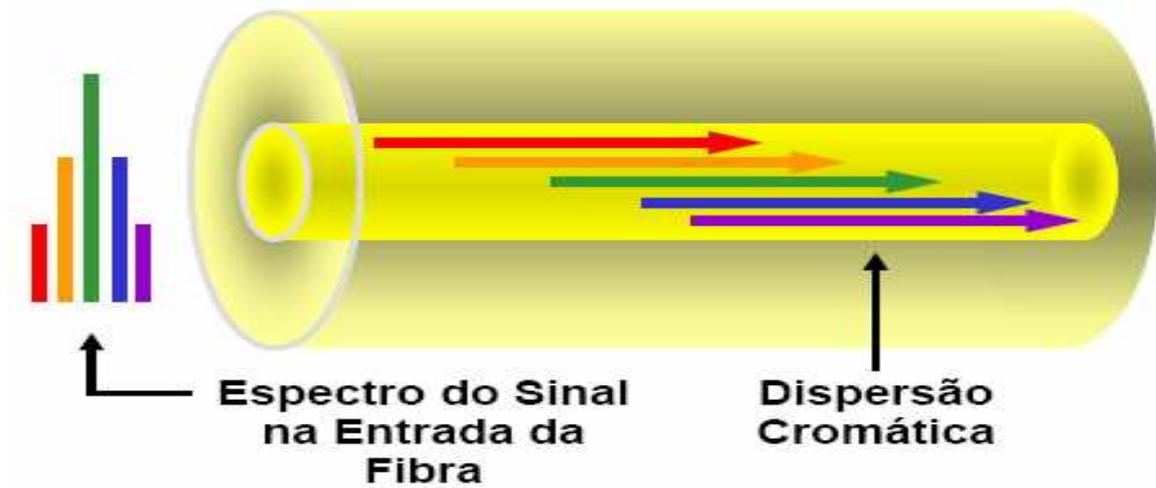


Figura 2.10 - Representação do fenômeno da dispersão intramodal ou de velocidade de grupo (dispersão cromática) em uma fibra óptica.

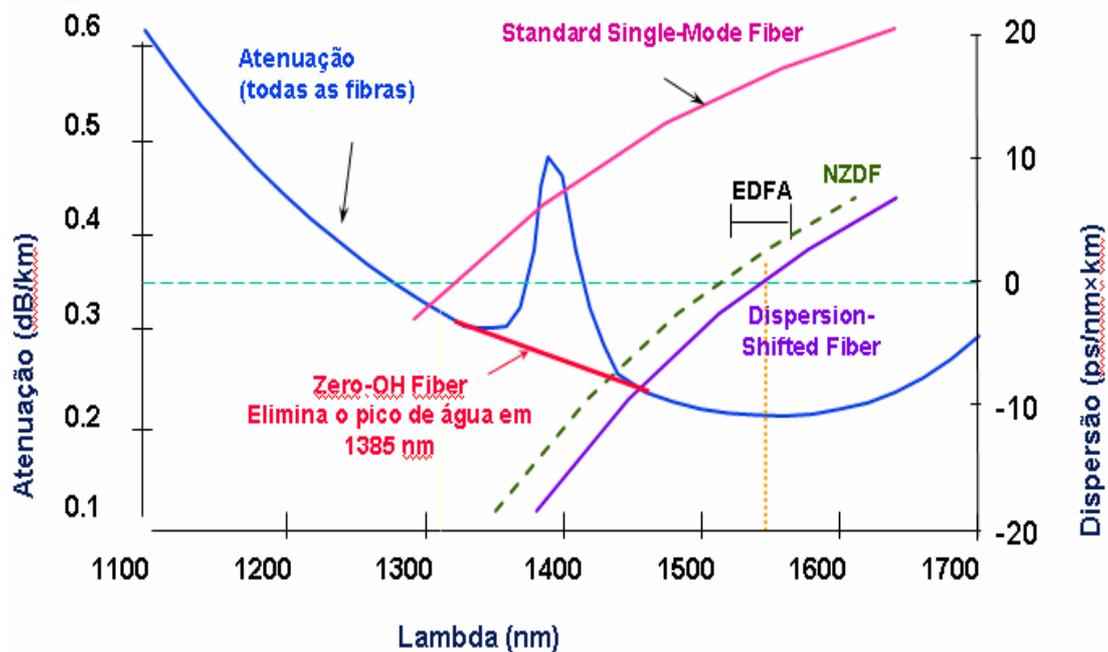


Figura 2.11 – Gráfico da atenuação e dispersão, para os tipos de fibras monomodo.

A Tabela 2.1 apresenta os valores usuais do coeficiente de dispersão cromática para os principais tipos de fibras ópticas.

Tipo de Fíbrea	Coeficiente de Dispersão @ 1550 nm	Características
SSMF	17 ps / nm.Km	Alta dispersão e baixa não linearidade
DSF	0 ps / nm.Km	Dispersão nula e alta não linearidade
NZDF	1.6 ps / nm.Km	Baixa dispersão e não linearidade moderada
DCF	- 80 ps / nm.Km	Alta dispersão negativa e alta não linearidade

Tabela 2.1 - Valores usuais do coeficiente de dispersão cromática para as fibras SSMF, DSF, NZDF e DCF.

Em uma fibra monomodo existe um determinado comprimento de onda, denominado λ_0 , cuja dispersão cromática é nula. As fibras do tipo SSMF apresentam λ_0 em torno de 1310 nm, enquanto nas fibras DSF este comprimento de onda situa-se ao redor de 1550 nm, conforme demonstrado na tabela 2.1.

Tanto na dispersão cromática quanto na PMD, o alargamento temporal dos pulsos gera uma sobreposição entre bits adjacentes, o que penaliza o sistema devido ao ruído presente no instante de amostragem do sinal. Este fenômeno é denominado interferência intersimbólica (*Intersymbol Interference - ISI*) e está representado na Figura 2.12.

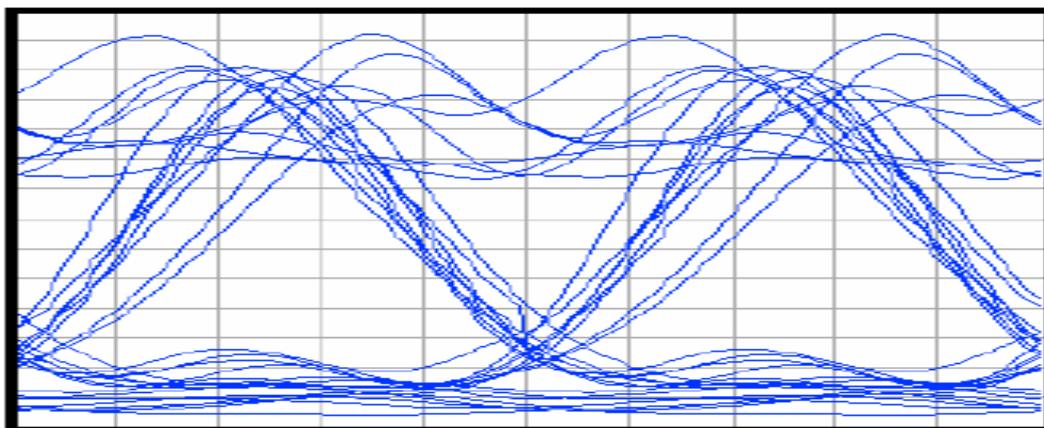


Figura 2.12 - Diagrama de olho de um sinal com interferência intersimbólica.

Verifica-se que, quanto maior a taxa de transmissão do sinal, maior será o impacto causado pela dispersão, dado que o alargamento temporal depende da duração dos pulsos. Em muitos casos é necessária uma compensação, obtida por dispositivos eletrônicos ou através do uso de segmentos de fibra com dispersão negativa ao longo do enlace. A fibra compensadora de dispersão (DCF) é muito utilizada para compensar a dispersão cromática.

2.6.1.3 - Dispersão por Modo de Polarização (PMD - “Polarization Mode Dispersion”)

A dispersão por modo de polarização (PMD) [17], é uma propriedade fundamental da fibra óptica monomodo; em que a energia do sinal a um dado comprimento de onda, é composta por dois modos de polarização ortogonais (Polarização refere-se à orientação do campo elétrico de um sinal de luz, o qual pode variar significativamente ao longo de uma fibra), com velocidades de grupo de propagação ligeiramente diferentes. A PMD causa sérias deteriorações na capacidade de transmissão dos sistemas, incluindo o espalhamento de pulso. Este efeito pode ser comparado com o da dispersão cromática (alargamento temporal do pulso), cujo fenômeno é relativamente estável. Em contrapartida, a PMD de fibras ópticas monomodo em qualquer comprimento de onda do sinal é instável, forçando os projetistas de sistemas a fazer as previsões estatísticas de PMD no sistema de transmissão digital. A instabilidade da PMD é causada pelas distorções assimétricas da fibra em relação a uma geometria cilíndrica perfeita; resultante do processo de fabricação; por tensão externa na instalação dos cabos, ou até mesmo pela dilatação causada pela variação de temperatura. Nos sistemas convencionais a PMD não é relevante, mas nos sistemas WDM que utilizam comprimentos de ondas extremamente pequenos, a PMD se torna um fator severamente limitante em sistemas de comunicações ópticas de longa distância operando em altas taxas, especialmente em relação à taxa de transmissão, Figura 2.13.

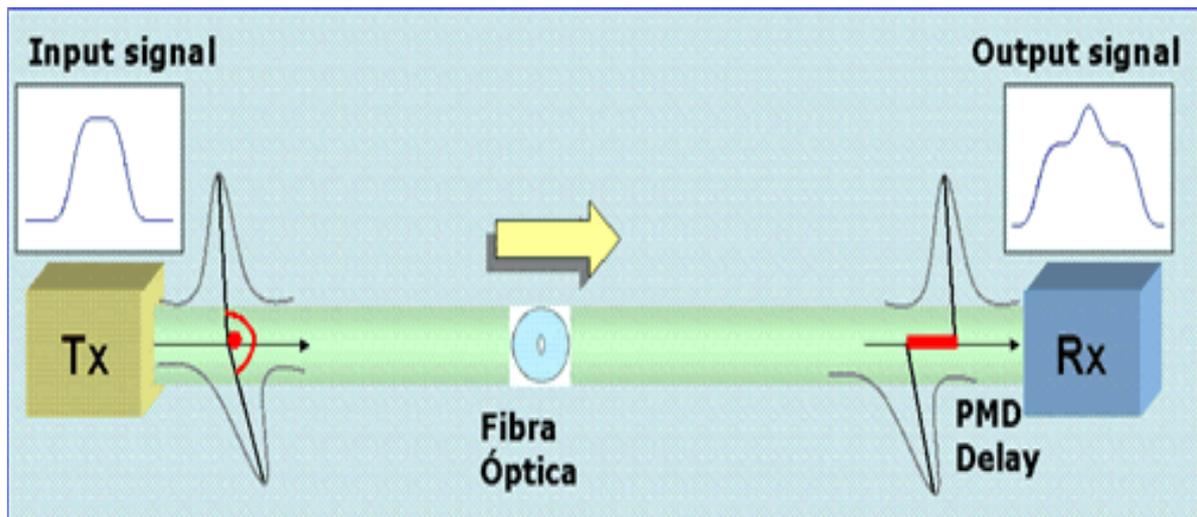


Figura 2.13 - Dispersão de modo de polarização (PMD).

Portanto, a dispersão por modo de polarização (*Polarization-Mode Dispersion* - PMD) é outra fonte de alargamento do pulso óptico. Em contraste com a dispersão cromática, a qual é um fenômeno relativamente estável ao longo da fibra, a PMD varia aleatoriamente ao longo da fibra.

2.6.1.4 - Ruído.

O ruído em sistemas de comunicações ópticas pode ser proveniente do transmissor; do canal de comunicação (fibra óptica e amplificadores ópticos) ou do próprio receptor [18]. Os efeitos de propagação na fibra originam ruído óptico no sinal. O ruído causado pela ASE é dominante em redes ópticas. No entanto, à medida que a taxa de transmissão e a densidade de multiplexação de canais nos sistemas WDM aumentam, o ruído causado pelos efeitos de propagação em fibra se torna dominante.

2.6.2 - Efeitos Não Lineares da Fibra Óptica

Em sistemas WDM os efeitos não lineares se manifestam de maneira mais intensa em sistemas com amplificação óptica, devido à maior potência na luz

propagada nas fibras, e ao maior caminho de interação disponível nesses enlaces [4] [19].

Diversos efeitos não lineares nas fibras ópticas podem conduzir a diafonia (crosstalk) entre canais de forma que a intensidade e a fase de um canal são influenciados por outros canais vizinhos [20] [21]; e, portanto, causam maior impacto em sistemas multicanais. Os processos SBS (Espalhamento Brillouin Estimulado - *Stimulated Brillouin Scattering*), SRS (Espalhamento Raman Estimulado - *Stimulated Raman Scattering*) e FWM (Mistura de Quatro Ondas - Four Wave Mixing) provocam ganhos de alguns canais, enquanto diminuem a potência de outros; causando assim diafonia entre canais. Já o SPM (Automodulação de fase – Self Phase Modulation) e o XPM (Modulação de fase cruzada - Cross-Phase Modulation) afetam somente a fase dos sinais. A relevância do produto potência versus distância para sistemas com amplificação fotônica pode ser tão grande que os efeitos não lineares tornam-se o fator dominante no projeto de sistemas de longa distância ou na utilização de WDM.

Existem cinco efeitos não lineares fundamentais que podem causar degradação do sinal transmitido, conduzindo a prejuízos no desempenho do sistema. Dividindo-os em duas classes ou categorias, temos os seguintes efeitos não lineares existentes na fibra:

Primeira Categoria - Espalhamentos Estimulados. Independem da dispersão.

- Raman - limita o número de canais - (SRS "*Stimulated Raman Scattering*").
- Brillouin - limita a potência por canal - (SBS "*Stimulated Brillouin Scattering*").

Segunda Categoria - Efeitos influenciados pela dispersão, e resultantes da alteração do índice de refração da fibra, dependentes da intensidade óptica; que produzem os seguintes efeitos:

- Automodulação de fase - (SPM “Self-Phase Modulation”).
- Modulação de fase cruzada - (XPM “Cross-Phase Modulation”).
- Mistura de quatro ondas ou de quatro fótons - (FWM ou FPM - “Four Wave Mixing ou Four Photon Mixing”).
- Instabilidade de modulação (Modulation Instability – MI).

Em sistemas WDM, estes fenômenos tornam-se importantes devido à diafonia (“cross talk”) produzido pelas não linearidades.

2.6.2.1 - Espalhamento Raman Estimulado (*Stimulated Raman Scattering* - SRS)

O espalhamento Raman estimulado causa transferência de potência entre canais, e é uma preocupação para sistemas de comunicação multicanaís, já que a potência total inserida na fibra pode atingir o limiar Raman. Ao se atingir o limiar a fibra funciona como um amplificador Raman, de modo que os canais de frequência mais baixa serão amplificados a partir dos canais de frequência mais alta.

O espalhamento Raman estimulado decorre da interação entre a luz e vibrações moleculares na fibra óptica, gerando um espalhamento de parte da luz injetada em frequências menores (espalhamento inelástico). A luz espalhada é co-propagante com o sinal injetado. Este efeito não linear é o que possui o maior limiar, ou seja, é o que requer a maior potência óptica injetada para a ocorrência do fenômeno. Em sistemas WDM, o espalhamento Raman causa uma redução da potência dos comprimentos de onda menores, com relação aos maiores. Isto pode ser compensado através do uso da técnica de pré-ênfase dos canais, reduzindo-se a potência dos canais de comprimento de onda maiores e aumentando-se a dos canais de comprimento de onda menores. Também pode ser contornado, diminuindo a potência óptica de entrada. Para o espalhamento Raman, a largura de linha deste fenômeno é bem mais larga (~ 15 THz) provocando portanto altos níveis de interferência entre os canais.

2.6.2.2 - Espalhamento Brillouin Estimulado (*Stimulated Brillouin Scattering* - SBS)

O espalhamento Brillouin estimulado; decorre da interação entre a luz e ondas sonoras na fibra óptica, gerando um espalhamento de parte da luz injetada com frequências menores (espalhamento inelástico) que se propagam em sentido oposto ao do sinal injetado (espalhamento contra-propagante). Suas principais conseqüências em sistemas de comunicações ópticas, é a redução da potência óptica transmitida pela fibra e a dificuldade de implementação de sistemas de transmissão bidirecional; ambos devidos ao retro-espalhamento de parte da luz injetada. Este efeito não linear pode ser reduzido através do alargamento espectral da fonte óptica, o que pode ser conseguido, por exemplo, pelo uso de modulação direta, sobremodulação de baixa intensidade (dithering) ou modulação de fase. O alargamento espectral da fonte leva a um aumento na potência de limiar do efeito. Assim como o SRS, o SBS também é pronunciado a altas taxas e altos níveis de potência óptica. O espalhamento estimulado de Brillouin apenas limita a potência por canal, pois a largura de linha deste espalhamento é estreita.

2.6.2.3 - Mistura de Quatro Ondas (Four Wave Mixing – FWM)

A mistura de quatro ondas (ou quatro fótons) FWM [22] [16] é um efeito caracterizado pela interação entre dois ou mais canais ópticos, com frequências diferentes, levando à geração de outros canais em novas frequências. Este efeito não linear penaliza fortemente os sistemas de transmissão WDM, pois os canais ópticos gerados pela mistura de quatro ondas muitas vezes têm a mesma frequência de outros canais injetados, gerando uma interferência entre canais denominada cross-talk.

Os efeitos de FWM são pronunciados com o decréscimo do espaçamento de canal dos comprimentos de onda e altos níveis de potência do sinal. Alta dispersão cromática também aumenta os efeitos de FWM [23]. Outra

conseqüência do efeito é a redução da potência óptica dos canais injetados, devido à transferência de parte desta potência para os novos canais gerados.

Uma das técnicas de redução do fenômeno da mistura de quatro ondas é a alocação dos canais ópticos injetados com espaçamento desigual dos comprimentos de onda, de forma que os novos canais gerados não coincidam com os injetados na fibra, reduzindo a interferência entre canais. Devemos destacar que o fenômeno de FWM é o principal limitante não-linear para sistemas que operam com múltiplos comprimentos de onda [24].

2.6.2.4 - Instabilidade de Modulação (Modulation Instability – MI)

A instabilidade de modulação é, na verdade, uma mistura de quatro ondas entre um dado canal e o ruído óptico proveniente da emissão espontânea do amplificador óptico. Ela aparece apenas na região de dispersão positiva da fibra (acima do λ_0) e é caracterizada pela presença de ruído óptico na forma de bandas laterais em torno de um dado canal.

2.6.2.5 – Auto Modulação de Fase (Self Phase Modulation - SPM)

Na presença de altas potências ópticas, o índice de refração do núcleo da fibra se torna dependente da intensidade da luz. Por outro lado, a fase da luz é dependente do índice de refração do meio em que se propaga. Então, variações de potência óptica na fibra são convertidas em variações de fase da luz. Este fenômeno gera variações de frequência ao longo do intervalo de duração de um pulso óptico, pois sua potência também varia neste mesmo intervalo. Na automodulação de fase, novas frequências são geradas a partir da variação da potência óptica de um dado canal.

A automodulação de fase (SPM) é o deslocamento de fase do sinal causado por ele mesmo. Os efeitos da SPM são mais pronunciados, para pulsos de maior intensidade; e intensificam os efeitos da dispersão cromática [23] [25].

2.6.2.6 - Modulação de Fase Cruzada (*Cross Phase Modulation - XPM*)

Na modulação de fase cruzada, novas frequências são geradas a partir da variação de potência óptica de outro canal. A modulação de fase cruzada (XPM) é o deslocamento de fase de um sinal causado pelas flutuações de intensidade de outros canais que compartilham a mesma fibra, para diferentes frequências ópticas [20]. Assim, a modulação de fase cruzada está presente apenas em sistemas multicanais, como os sistemas WDM.

Tanto para a SPM, como para a XPM, há um alargamento espectral do pulso óptico, que pode resultar em um alargamento temporal devido à dispersão. Em sistemas multicanais, a potência de um canal provocará modulações nos demais canais; portanto temos uma modulação cruzada de fase (XPM).

2.7 – Ferramentas para Análise de Desempenho do Sistema Óptico

O principal desafio na operação de redes ópticas, sobretudo sistemas DWDM, consiste em como analisar se o sistema está funcionando adequadamente. Assim, existe uma necessidade chave, para monitorar cada canal óptico que trafega na rede, de forma inteligente, a fim de satisfazer os critérios de confiabilidade da rede e garantir uma determinada qualidade de serviço [25]. Os parâmetros chaves para monitorar o desempenho de um sistema óptico são:

- O comprimento de onda
- A potência óptica
- A relação sinal ruído óptica (*Optical Signal to Noise Rate - OSNR*).
- Outra importante figura de mérito para analisar o desempenho do sistema é (*Bit- Error Rate - BER*). A BER depende da OSNR.

2.7.1 - Relação Sinal Ruído Óptica (Optical Signal to Noise Ratio – OSNR)

A relação sinal ruído óptica (OSNR) é um importante parâmetro de projeto. A OSNR, é a razão da potência do sinal óptico sobre a potência de ruído; e é expressa em decibéis (dB) através da seguinte fórmula 2.3) [25].

$$\text{OSNR} = 10 \log \left(\frac{P_s}{P_n} \right) (\text{dB}) \quad (2.3)$$

Onde P_s é a potência do sinal e P_n é a potência do ruído.

Em sistemas amplificados, o ruído é amplificado junto com o sinal. Portanto, a OSNR indica a qualidade do sinal recebido. Uma das conseqüências de se ter uma OSNR baixa nestes sistemas, é que não importa o quão forte o sinal chegue num bom receptor; a presença de ASE degradará o sinal e introduzirá erros [26]. Embora outros dispositivos adicionem ruídos ao sistema, o ruído oriundo do amplificador óptico é considerado a principal fonte de degradação da OSNR [26]. Em sistemas WDM, com vários estágios de amplificadores cascadeados, o ruído ASE torna-se um sério problema. A OSNR degrada-se ao longo do enlace, devido aos efeitos cumulativos da figura de ruído de cada estágio do amplificador [23].

2.7.2 - Taxa de Erro de Bit (Bit Error Rate – BER)

Uma forma de se avaliar o desempenho de um sistema de comunicações ópticas; constituído pelo transmissor, pelo canal (fibra óptica) e pelo receptor, é através da medição da taxa de erro do sistema, ou taxa de erro de bit (*Bit Error Rate* - BER), que é definida como a probabilidade de identificação incorreta de um bit no circuito de decisão do receptor. Esta taxa pode ser definida como o número de erros por segundo (neste caso dependente da taxa de transmissão) ou como a probabilidade média de ocorrência de erros no circuito de decisão do receptor. Neste último caso, uma taxa de 10^{-6} corresponde em média, a um erro, em um milhão de bits recebidos. A medição é realizada através do uso de um

equipamento que gera uma seqüência digital pseudo-aleatória que é transmitida, e em seguida comparada com a seqüência recebida. O receptor óptico pode, então, ser caracterizado pela mínima potência óptica necessária para assegurar a recuperação do sinal digital transmitido com uma dada taxa de erro. Esta potência mínima é denominada sensibilidade do receptor. Valores como 10^{-11} ou até mesmo 10^{-15} são considerados os padrões de taxa de erro para determinação da sensibilidade e avaliação de desempenho dos atuais sistemas de comunicações ópticas.

Um critério comumente usado para receptores ópticos digitais é uma $BER \leq 1 \times 10^{-9}$, o que corresponde a uma média de um bit detectado errado, à cada um bilhão de bits enviados [21]. Para a escolha das curvas de BER, as mesmas devem apresentar valores de BER acima e abaixo do valor mínimo esperado de desempenho do sistema, para fornecer uma visão global. Para o desempenho mínimo requerido, em sistemas ópticos; para o SDH, necessitamos de um valor de $Q = 6,36$; onde Q , é o fator de qualidade, que é um parâmetro que reflete diretamente a qualidade de um sinal de comunicação óptico digital. Quanto maior o fator Q , melhor a qualidade do sinal óptico. Adotando este valor de referência, podemos calcular a margem do sistema pela seguinte expressão:

$$MS = 10 \log \frac{Q}{3,36} \quad (2.4)$$

Daí constata – se que uma $BER = 10^{-15}$, deixa uma margem de aproximadamente 1 dB; margem que podemos reservar para degradações não previstas. A margem de sistema recomendada pelo ITU-T [27], deve ficar entre 2 e 4 dB para prever o envelhecimento dos dispositivos, garantindo o desempenho mínimo ($BER = 10^{-10}$) no final da vida útil dos equipamentos.

2.7.3 - Diagrama de Olho

Outra forma muito empregada de se avaliar a qualidade de sinais digitais, incluindo os sinais ópticos, é a análise do diagrama de olho [16]. Trata-se de um padrão observado na tela de um osciloscópio, cujo formato se assemelha ao do olho humano; correspondente à superposição de todas as seqüências possíveis de bits 0 e 1. A Figura 2.14 apresenta uma seqüência de bits e o respectivo diagrama de olho, como observado em um osciloscópio.

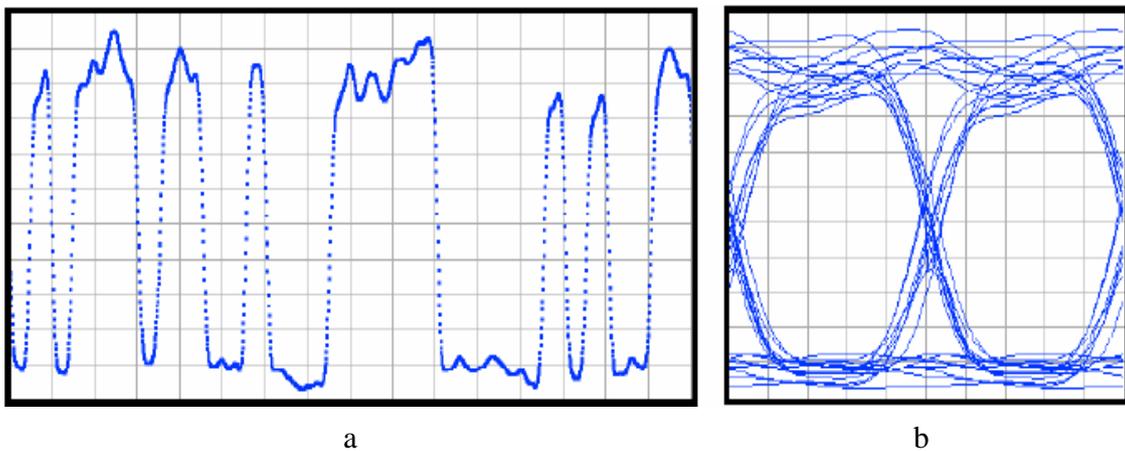


Figura 2.14 - (a) seqüência de bits e (b) respectivo diagrama de olho.

Em sistemas de transmissão digital com velocidade suficientemente alta, é comum usar o diagrama de olho como um dos principais diagnósticos de desempenho do sistema. Embora o diagrama seja essencialmente formado por valores de pior caso, ele geralmente dá uma boa idéia das deteriorações causadas pela interferência entre símbolos, fornecendo ao projetista uma indicação da melhor posição do limiar e do instante de amostragem; bem como a tolerância a erros estáticos e dinâmicos (“jitter”) do relógio. O diagrama de olho é importante como diagnóstico do sistema [28], e sua importância decorre do seu valor como estimativa da robustez das decisões sobre os bits recebidos com relação ao erro de sincronismo de símbolo. Como já mencionado, o diagrama de olho mostra as condições de pior caso da interferência intersimbólica.

Outro método de análise de diagramas de olho é baseado em novos diagramas, denominados de padrões de taxa de erro [26]. O diagrama de olho mostra em cada instante da janela de bit, os valores de pior caso do sinal para todos os níveis permitidos; contaminado pela interferência intersimbólica.

O diagrama de olho é “mapeado” em termos de probabilidade de erro, permitindo uma análise qualitativa e quantitativa das degradações presentes, dando-nos uma visão global do sistema. O diagrama de olho permite visualizar as distorções do sinal no domínio do tempo [25]; porém, vários fenômenos ou efeitos lineares e não lineares presentes em sistemas ópticos de alta velocidade, prejudicam os valores do diagrama de olho clássico e a curva de probabilidade de erros como diagnóstico de desempenho.

A simples observação do diagrama de olho já revela aspectos importantes do sinal. Muita informação sobre o sistema pode ser extraída desta técnica. A espessura das linhas, por exemplo, indica a quantidade de ruído presente. Os desvios no tempo de chegada dos pulsos, um parâmetro conhecido como Jitter, são evidenciados por linhas verticalmente espessas. A Figura 2.15 ilustra os principais parâmetros considerados no diagrama de olho [29].

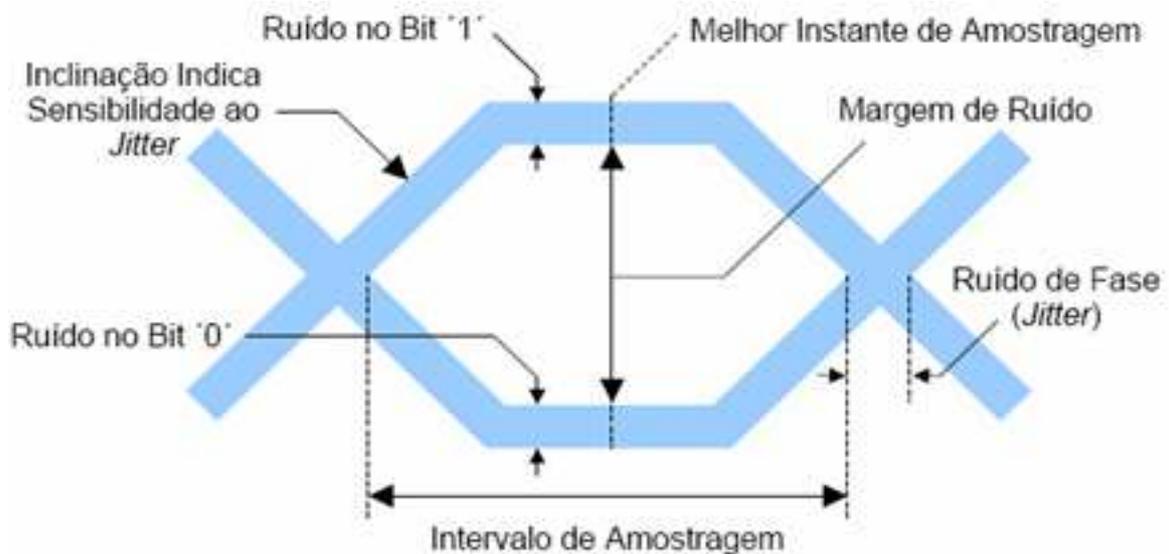


Figura 2.15 - Principais parâmetros do diagrama de olho.

Um parâmetro denominado penalidade, representa o acréscimo de potência necessário no receptor para compensar a degradação da qualidade de um sinal recebido. Diversos fatores podem originar penalidades em um sistema de comunicação óptica, como os efeitos de propagação na fibra, ou mesmo, a simples presença de ruído elétrico no receptor; e como já mencionado, a técnica do diagrama de olho, feita no domínio do tempo, é uma ferramenta importante para se avaliar o desempenho de um sistema digital, pois permite uma visualização da distorção na forma de onda do sinal transmitido num osciloscópio [25].

Muita informação sobre o sistema pode ser extraída desta técnica. As informações a respeito das distorções fornecidas pelo diagrama de olho do sinal podem ser obtidas pelos seguintes parâmetros [25]:

- A largura da abertura do olho (no eixo horizontal) define o intervalo de tempo sobre o qual o sinal recebido pode ser amostrado sem erro devido à interferência intersimbólica (ISI).
- O melhor momento de amostragem é o que corresponde ao de maior abertura vertical do olho.
- A altura da abertura do olho é reduzida quando ocorre distorção na amplitude do sinal. A distorção máxima é dada pela distância vertical entre o topo da abertura do olho e o máximo nível do sinal. Quanto mais fechado o olho se tornar, mais difícil é a detecção do sinal.
- A abertura do olho na direção vertical, no momento da amostragem, mostra a margem de ruído ou a imunidade ao ruído.
- A taxa na qual o olho se fecha, quando o instante de amostragem varia (isto é, proporcional à inclinação dos lados do diagrama de olho) determina a sensibilidade do sistema a erros de temporização. A probabilidade de ocorrência deste tipo de erro aumenta à medida que a inclinação torna-se mais acentuada.
- Jitter temporal (também conhecido como eixo de jitter ou distorção de fase) aparece devido ao ruído no receptor e à distorção do pulso na fibra.

2.8 - Técnicas de Correção de Erro (Forward Error Correction - FEC)

Os meios utilizados para as transmissões digitais; sejam estes cabos de fibras ópticas, ou o espaço livre (como por exemplo, em enlaces de rádios microondas digitais), sempre introduzem ruídos.

Quando presente em um meio de transmissão, o ruído, e também alguns outros elementos, relativos a este próprio meio, causam alterações ou até a perda do sinal digital que está sendo transmitido. A técnica denominada FEC (*Forward Error Correction*) [30] permite através de alterações no sinal digital que está sendo transmitido; melhorias no desempenho sistêmico.

2.8.1 - FEC em Redes de Longa Distância

Uma das primeiras aplicações nas redes ópticas foi em regeneradores de equipamentos SONET/SDH e, nos multiplexadores de equipamentos WDM. A técnica IB – FEC (*In Band*) se baseia no aproveitamento de bites que não são utilizados no frame do cabeçalho de sistemas SDH/SONET, para o envio do código de correção, os quais permitem correções de aproximadamente oito erros por frame, permitindo adicionar margens de até 4 dB's na relação sinal óptico / ruído, permitindo um aumento substancial da distância entre lances em comparação a outros sistemas que não empregam FEC. Entretanto a técnica OOB – FEC (*Out Of Band*), que permite correções de até 1.024 erros por frame, apesar de mais complexa e conseqüentemente um pouco mais custosa, permite as seguintes vantagens, em comparação a outros sistemas que não empregam FEC:

- Adicionar margens de até 9 dB na relação sinal óptico / ruído.
- Quadruplicação do número de canais.
- Quadruplicação das taxas de transmissão.
- Aumento entre 30% a 40% das distâncias entre amplificadores de linha ópticos.
- Aumento do espaçamento entre regeneradores, de 2 à 4 vezes.
- Redução de custos.

Com o aumento da utilização do FEC, em equipamentos do tipo CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*) e WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), os preços estão ficando mais atraentes. Pelas vantagens que apresentam, espera-se que doravante todas as redes ópticas, independente do tipo ou finalidade, tenham obrigatoriamente esta tecnologia incorporada.

CAPÍTULO 3 – ANÁLISE DO PROJETO DE EXPANSÃO DO BACKBONE ÓPTICO DO CONVÊNIO DE COOPERAÇÃO TÉCNICA ENTRE A ELETRONORTE E O GOVERNO DO ESTADO DO PARÁ

3.1 – Introdução

Este capítulo apresenta as características do projeto de expansão do backbone óptico da Eletronorte, que está sendo implementado em parceria com o Governo do Estado do Pará, e apresenta uma análise deste projeto através de resultados de simulações.

O convênio de cooperação técnica entre a Eletronote e o Governo do Estado [31] [32], tem como objetivo, incrementar a infra-estrutura de telecomunicações do Estado do Pará, mediante o compartilhamento da infra-estrutura de telecomunicações sobre fibras ópticas da Eletronorte. Tal convênio; é a implantação de um backbone óptico que utiliza tecnologia DWDM para atendimento ao Governo do Pará, que possibilita a interligação entre os principais órgãos do Estado. Esta integração cria um ambiente favorável à incorporação de tecnologia e inovação em processos e produtos, aumentando as vantagens competitivas nos planos regional, nacional e internacional; facilitando a implementação de redes em arranjos produtivos, governança eletrônica, educação à distância e telemedicina, proporcionando ações para inclusão digital da população, através da oferta dos mais variados serviços. Por outro lado, a Eletronorte tem interesse em aproveitar a capacidade excedente dos equipamentos eletrônicos adquiridos pelo Estado, como auxílio à operação e manutenção de seu sistema de transmissão de energia elétrica, e ainda prestar serviços de telecomunicações, uma vez que é autorizada pela Anatel a prestar estes serviços a terceiros.

3.2 – Concepção do Projeto de Expansão do Sistema

Esta concepção tem a finalidade de definir as características principais para a implantação da rede de transporte DWDM e SDH (STM-16) no Estado do Pará para o atendimento à parceria firmada entre a Eletronorte e o Governo do Estado

do Pará. Esta rede visa o atendimento aos serviços de telecomunicações requeridos pelos órgãos do Estado (inclusão digital e pesquisa), bem como para a comercialização de serviços de telecomunicações por parte da Eletronorte.

O projeto visa fazer o atendimento de uma grande demanda de serviços de telecomunicações no Estado do Pará. O backbone óptico implantado no Estado, ao longo das linhas de transmissão da Eletronorte, abrange as seguintes cidades, onde a Eletronorte possui sua rede óptica: Marabá, Jacundá, Tucuruí, Tailândia, Abaetetuba, Belém, Santa Maria do Pará, Pacajá, Altmira, Uruará, Rurópolis. As redes ópticas conectando Santarém, Rurópolis e Itaituba, são também utilizadas para a implementação deste projeto. Estas localidades são interligadas através de uma rede óptica da Eletronorte, para atender a comercialização de serviços e a demanda do Governo do Estado. A Figura 3.1, mostra as localidades a serem atendidas pelo backbone óptico.



Figura 3.1 - Localidades a serem atendidas pelo backbone óptico.

A implantação de uma rede DWDM, em conjunto com equipamentos SDH, proporciona uma variedade de serviços e capacidades de transporte suficientes para atendimento à demanda atual e futura do Governo do Estado do Pará, permitindo um planejamento de ações futuras. A seguir, é apresentada a topologia da rede óptica DWDM e SDH (STM -16) incluindo as distâncias entre as estações conforme a Figura 3.2.

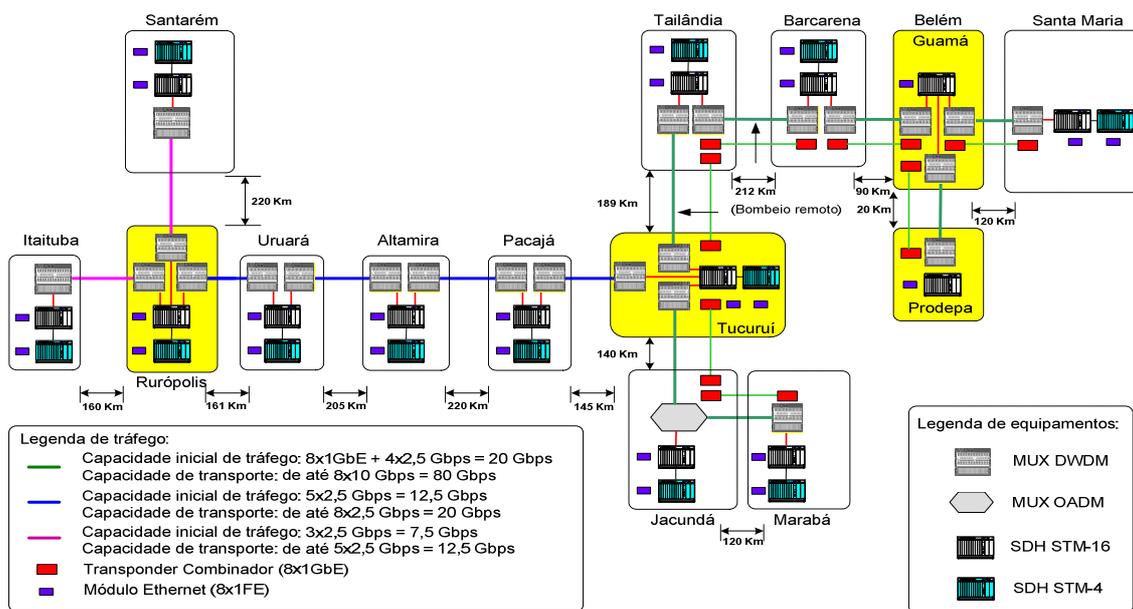


Figura 3.2 - Descrição do sistema backbone óptico com tecnologia DWDM e SDH no Pará.

O backbone óptico visa o atendimento das necessidades do Estado do Pará e da Eletronorte; empresa esta, que é responsável pela operação e manutenção desse sistema. O backbone óptico implantado nas linhas de transmissão e localidades próximas às subestações e repetidoras da Eletronorte com tecnologia DWDM e SDH – STM16; é o conjunto de equipamentos e softwares destinados a prover os meios para formação do backbone óptico do Estado. Os cabos ópticos da Eletronorte fazem a conexão entre as diversas localidades. As atenuações e distâncias entre as localidades do backbone; são apresentadas na Tabela 3.1. No cálculo da atenuação do sistema foi considerado a margem de segurança de 3 dB. Os valores indicados entre parênteses são os valores medidos no trecho em questão. Os valores de atenuação e de dispersão foram calculados com base no dimensionamento do sistema óptico.

Com base nas informações de atenuações e distâncias mostradas na Tabela 3.1, os cálculos foram efetuados para o dimensionamento dos amplificadores e pré-amplificadores ópticos, para cada enlace da rede. A dispersão cromática e a dispersão por modo de polarização (PMD) foram avaliadas, mesmo sabendo que

estas penalidades não têm grandes influências em taxas de transmissão até 2,5 Gbps.

Trecho	D (Km)	Atenuação Total do Link. Resultado (dB), com $L_e = 0,03$	Dispersão [ps/nm] (Normal 18 ps/nm por Km)
Santa Maria do Pará/ Belém	120	34,52	2286,00
Belém / Prodepa	20	9,08	396,00
Belém / Barcarena (Vila do Conde)	90	27,32	1719,00
Barcarena (Vila do Conde) /Tailândia	212	56,59	4024,80
Tailândia/Tucuruí	189	51,07	3590,10
Tucuruí/Jacundá	140	39,32	2664,00
Jacundá/Marabá	120	34,52	2286,00
Tucuruí/Pacajá	145	(31,50)	2758,50
Pacajá/Altamira	220	(48,00)	4176,00
Altamira/Uruará	205	(55,00)	3892,50
Uruará/Rurópolis	161	(51,50)	3060,90
Rurópolis/Itaituba	160	44,12	3042,00
Rurópolis/Santarém	220	58,51	4176,00

Tabela 3.1 – Atenuações e distâncias entre as localidades.

A topologia da rede visa a comercialização dos serviços de comunicação para terceiros e também para o uso da própria empresa; para o uso dos órgãos do Governo, não sendo de uso específico para a manutenção do sistema elétrico. Logo, o nível de proteção da rede foi avaliado em cima da importância dos serviços oferecidos e principalmente do orçamento disponível para o projeto.

O backbone possui uma plataforma transparente que permite o transporte dos mais diversos tipos de redes existentes no mercado tais como: Fast-Ethernet, 10/100 Base T, Giga-Ethernet, E1 (G.703), FICON, ESCON, PDH (2M/34M/140M), SDH (STM-1/4/16), Fiber Chanel, Ethernet, e SAN (*Storage Área Network*). O backbone possui transponders na taxa de 2,5 Gbps, que permitem que os sinais dos equipamentos SDH sejam transportados pelo equipamento DWDM livremente, assegurando a transparência do alto fluxo de dados.

3.3 – Dimensionamento do Sistema Óptico

O objetivo do dimensionamento é determinar a faixa dinâmica do sistema óptico, isto é, a diferença mínima que deverá ser exigida entre a potência óptica de transmissão e a sensibilidade do fotodetetor, para uma BER (*Bit Error Rate*) menor ou igual que 10^{-10} ; e a máxima dispersão cromática permitida para o equipamento. O cálculo da atenuação foi realizado com base nos seguintes parâmetros e equação; que mostra a diferença entre a potência óptica de transmissão e a potência óptica de recepção (sensibilidade do fotodetetor), que é dada pela expressão abaixo.

$$(P_o - P_r) \geq D \times (L_f + L_e/D_e + L_e/D_a + L_t) + M_c + N_c.L_c + D_d + M_e \quad (3.1)$$

A atenuação total do link em dB é dada por:

$$A_T = D \times (L_f + L_e/D_e + L_e/D_a + L_t) + M_c + N_c.L_c + D_d + M_e; \text{ onde :} \quad (3.2)$$

P_o = potência óptica de transmissão;

P_r = sensibilidade do fotodetetor;

D = comprimento da via óptica em km;

Lf = atenuação da fibra óptica por Km em 1550nm;

Le = atenuação da emenda óptica dB;

De = comprimento médio da bobina em km;

Da = distância entre emendas adicionais futuras em km;

Mc = margem do cabo por Km devido ao envelhecimento e variação de temperatura da fibra;

Lt = variação da atenuação da fibra óptica devido à variação do comprimento de onda de emissão do laser com relação a 1550 nm;

Nc = número de conectores ópticos;

Lc = atenuação do conector óptico;

Me = margem do equipamento devido a envelhecimento.

Dd = penalidade por dispersão.

Considerando os seguintes parâmetros:

Le = 0,03 dB; Lt = 0,01 dB/km; Lc = 0,5 dB

De = 4,0 km; Lf = 0,22 dB/km; Dd = 0,5 dB

Da = 30 km; Nc = 2; Me = 2 dB

Mc = 0,025 dB/km (máx. 2 dB)

O comprimento do cabo OPGW considerado para fins de dimensionamento são 5% superior ao comprimento da linha. Acrescenta-se, ainda, aproximadamente 1000 metros, referentes aos cabos ópticos dielétricos das estações, para o comprimento total da via óptica, que vai do conector óptico de saída do transmissor ao conector óptico de entrada do receptor.

Assim, o comprimento da via óptica (D) foi determinado somando-se o comprimento do cabo OPGW (1,05 x comprimento da LT) e os comprimentos dos cabos ópticos dielétricos nas estações e na estação repetidora (1000 m). Para uma BER 10^{-10} , a atenuação, e a reserva de potência solicitada; foram previstos a utilização de amplificadores ópticos de potência na saída dos lasers, para garantir a referida BER. A máxima dispersão cromática permitida pelo

equipamento é dada pela dispersão de 18 ps/nm por km da fibra óptica em 1550 nm multiplicada pelo comprimento da via óptica.

3.4 – Implantação de Cabos Ópticos Auto Sustentados em Aproximações Ópticas, entre Sites da Eletronorte e Prodepa (Governo do Pará)

O Estado do Pará através da Secretaria de Estado de Desenvolvimento Ciência e Tecnologia (SEDECT); implantou cabos ópticos dielétricos auto-sustentados em aproximações ópticas entre sites das Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A – Eletronorte, e sites da empresa de Processamento de Dados do Pará – PRODEPA [32].

As cidades atendidas são: Santa Maria do Pará, Barcarena (Vila do Conde), Tailândia, Tucuruí, Jacundá, Marabá, Pacajá, Altamira, Rurópolis, Uruará, Itaituba e Santarém; todas no Estado do Pará.

Em cada uma dessas cidades, a sala de telecomunicações das subestações de energia ou a estação repetidora óptica da Eletronorte, já existente, é interligada a uma estação de telecomunicações do Estado, dentro da área urbana, através dos cabos ópticos autosustentados; com a finalidade de prover comunicações de alto desempenho entre “sites” do próprio Estado, utilizando a infra-estrutura de cabos ópticos da Eletronorte.

As fibras ópticas da Eletronorte estão posicionadas no interior dos cabos pára-raios da linha de transmissão de energia, que começam e terminam em suas subestações de energia. Este tipo especial de cabo pára-raios é chamado de cabo OPGW (*Optical Ground Wire*). A Figura 3.3 ilustra o enunciado.

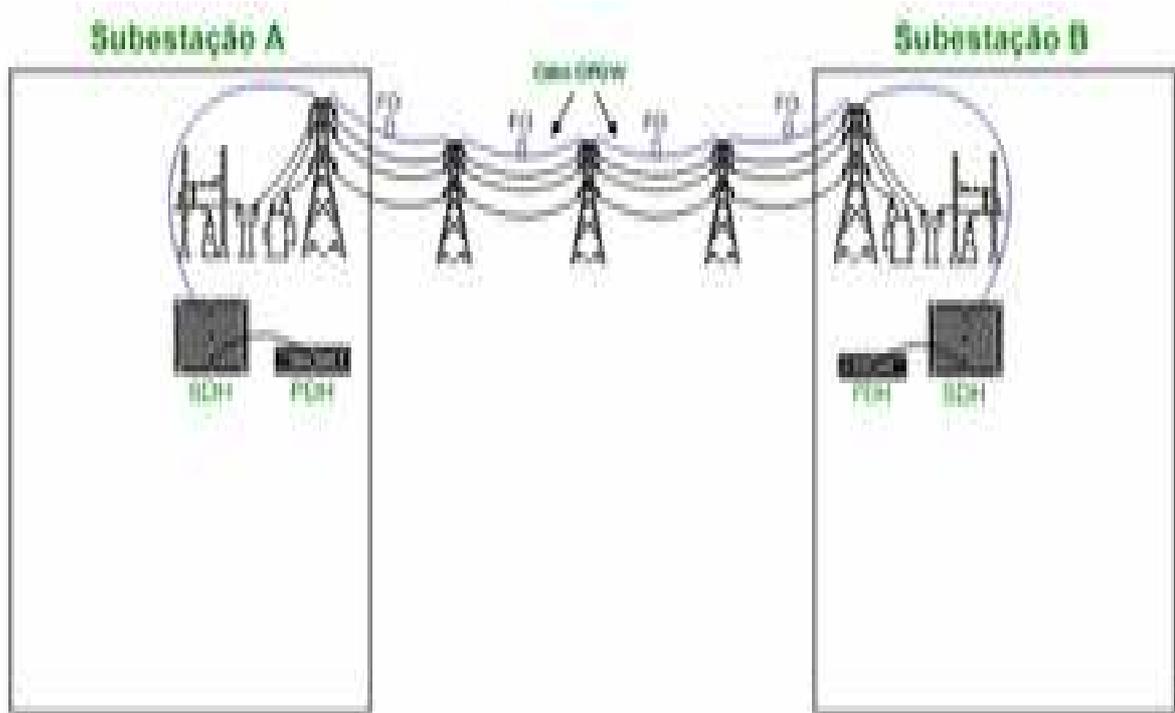


Figura 3.3 – Comunicação óptica entre subestações.

As características técnicas do cabo óptico OPGW, do sistema Navega Pará, relacionadas às fibras ópticas, estão de acordo com a recomendação G.652 da ITU-T e a norma NBR 13488. O cabo óptico utilizado é o cabo óptico dielétrico – CFOA-SM-DD-G – PIRELLI, constituído por fibras monomodo revestidas em acrilato, posicionadas em tubos preenchidos com geléia.

Os tubos são reunidos ao redor de um elemento central chamado dielétrico e são protegidos por uma armação de fios de aramida, fita de enfaixamento e capa externa de polietileno. É utilizado em dutos fixados em canaletas de passagem de cabos, interligando o cabo OPGW à sala de equipamentos.

A Tabela 3.2 mostra as características do cabo OPGW, e a Figura 3.4 mostra a composição do cabo óptico OPGW (*Optical Ground Wire*).

Características do cabo	Valores nominais	Unidade
Número de fibras ópticas	36	---
Diâmetro externo	14,5	mm
Peso	627	Kg / Km
Diâmetro mínimo de curvatura (instalação)	1600	mm
Tensão de ruptura nominal	9100	Kgf
Capacidade térmica	73	KA ² .seg

Tabela 3.2 – Características do cabo óptico OPGW.

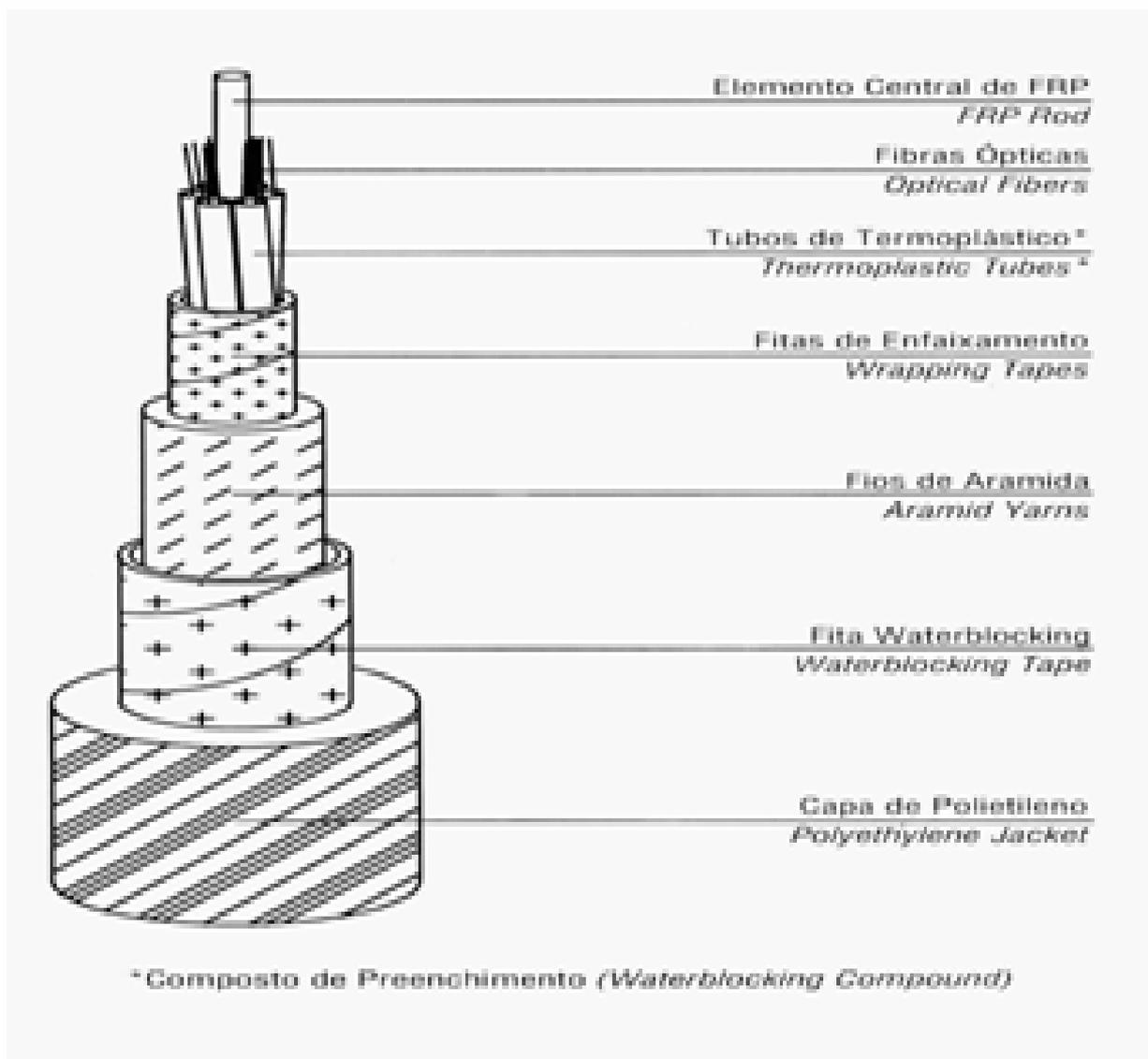


Figura 3.4 - Composição do cabo óptico OPGW (Optical Ground Wire).

As subestações de energia da Eletronorte, geralmente ficam distantes dos centros das cidades. Os prédios onde estão os órgãos do Governo do Estado do Pará, ao contrário das subestações, ficam nos centros dessas cidades. Assim, será feita a interligação das subestações, com estes prédios, onde esta interligação é chamada de aproximação. Para um melhor aproveitamento do potencial dos equipamentos, e para se obter um menor custo da aproximação; serão instalados os equipamentos nos prédios do Governo do Estado. Assim, a

aproximação destes prédios com as subestações da Eletronorte, será por meio de cabos dielétricos, conforme ilustrado na Figura 3.5.

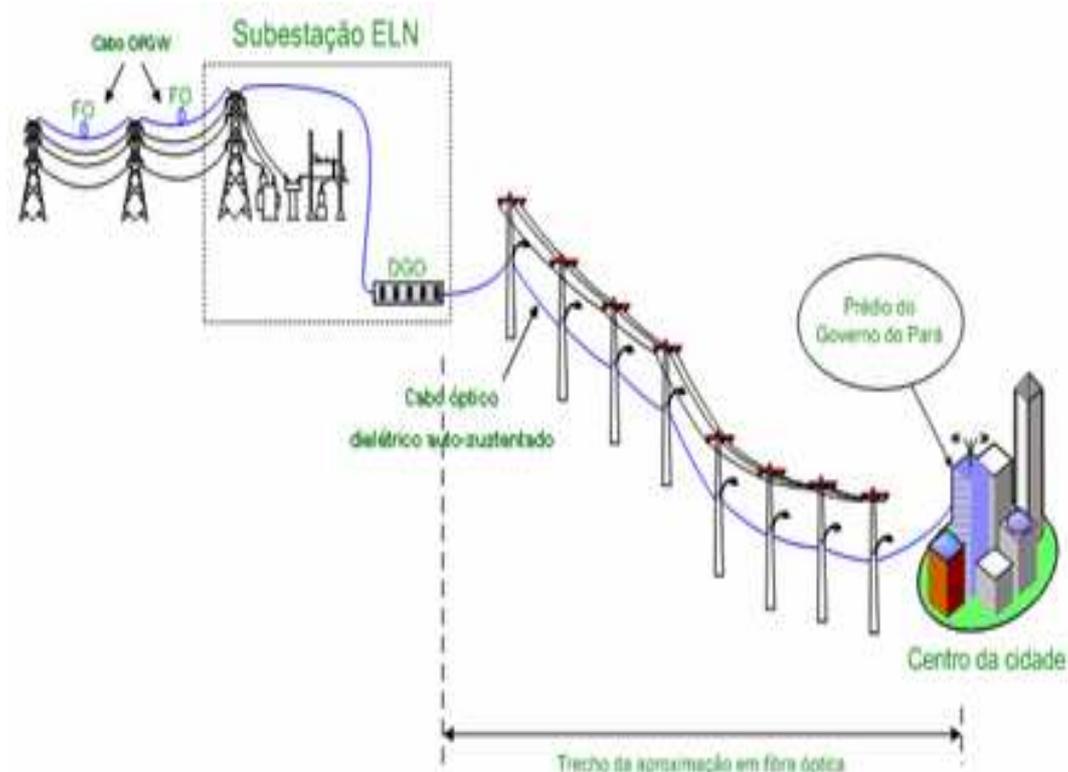


Figura 3.5 – Aproximação entre a SE da Eletronorte e o site no centro da cidade.

Nos prédios do Governo, a Eletronorte tem uma sala para instalação dos equipamentos, com acesso exclusivo, para realização de manutenção, inspeção, etc. Em outra sala próxima à da Eletronorte, o Governo do Estado terá outra sala com total acesso às facilidades do sistema através de equipamentos ali instalados; como STM – 1; STM – 4; STM – 16; DGO; DID, cabo coaxial 75 ohms para sinais com velocidade de 2 Mbit/s.

Ambas as salas estão interligadas por intermédio de fibras ópticas. Isto se faz necessário para se separar os gradientes de potencial de cada uma, tornando as instalações mais seguras numa eventual elevação de potencial (queda de raios, oscilação da rede de energia, etc).

Um sistema de aterramento apropriado e eficiente garante a integridade dos equipamentos e a segurança das pessoas. Na Figura 3.6, é mostrado o detalhamento das salas.

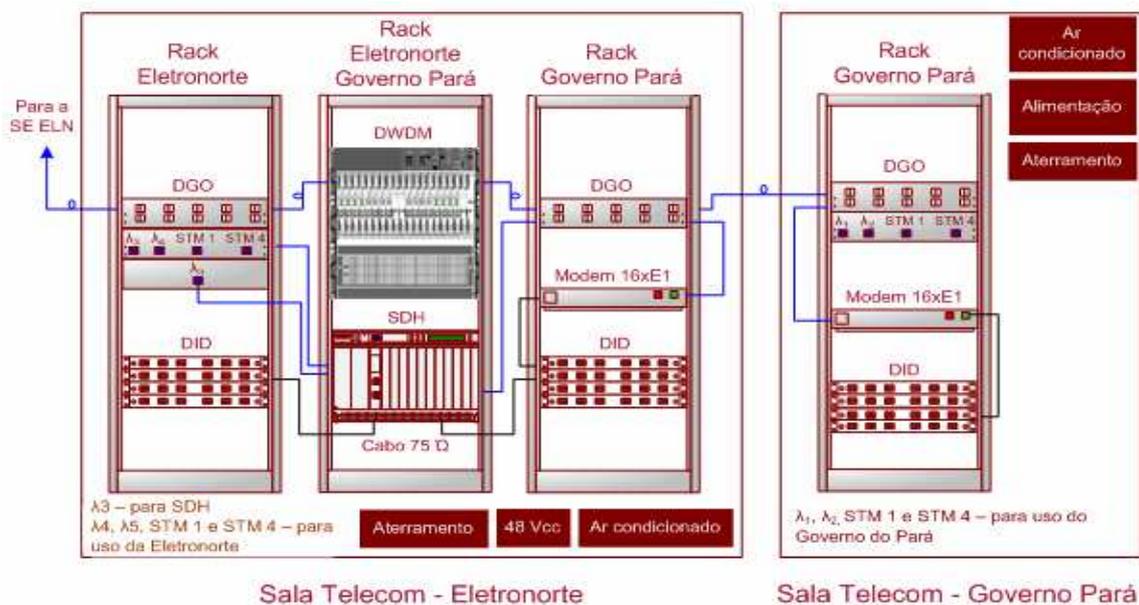


Figura 3.6 - Diagrama de interligação das salas de telecomunicações.

A seguir, são apresentados alguns dos tipos de serviços e conexões que o Governo do Estado do Pará poderá utilizar com o sistema.

- Interligação de redes LAN de computadores;
- PABX (IP ou convencional) interligados formando uma única rede;
- Integração dos diversos órgãos do Governo do Estado;
- Serviços de Internet banda larga (inclusão digital);
- Centros de pesquisa;
- Telemedicina;
- TV digital;
- Educação à distância;
- Segurança à distância;
- Vídeo conferência.

Os meios de conexão que viabilizam a aproximação e integração das mais diversas localidades da cidade, a partir da sala de telecomunicações nos prédios do Governo do Estado, são: sistema rádio, fibras ópticas com modem, Wimax,

Wifi, etc. A Figura 3.7 mostra o diagrama de interligação entre os diversos órgãos do Governo.

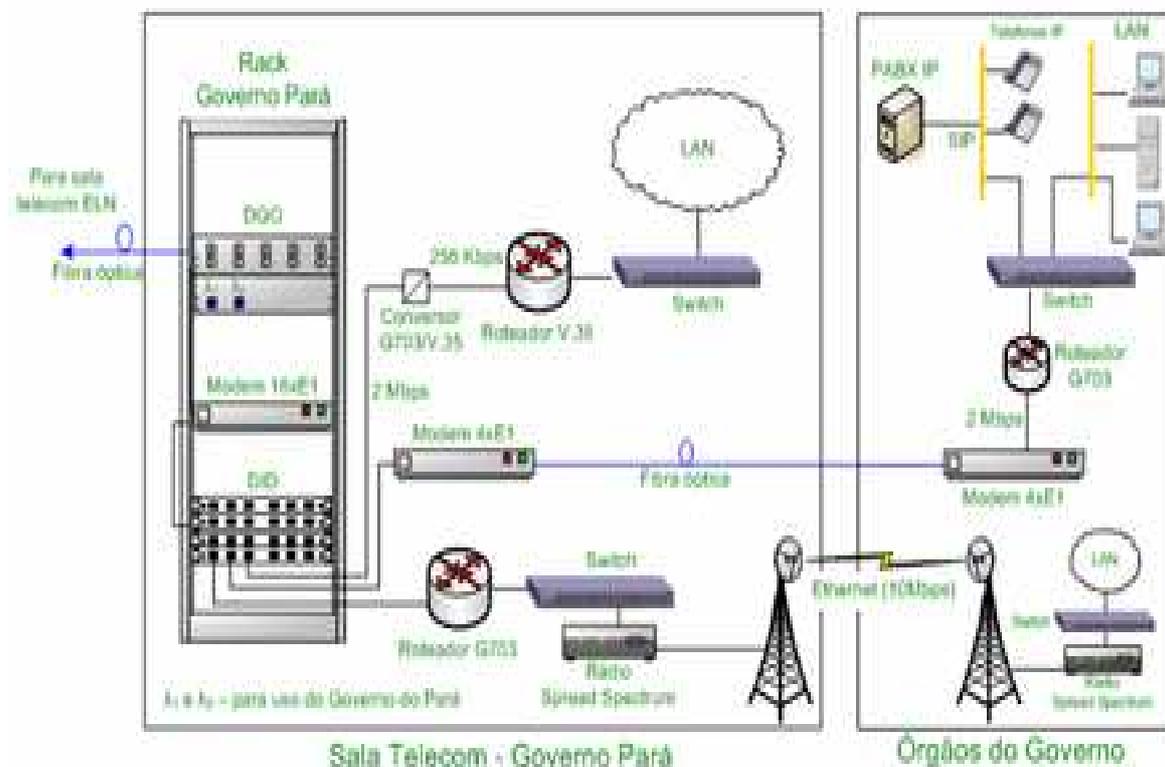


Figura 3.7 – Tipos de interligações entre os diversos órgãos do Governo.

A rede óptica, da aproximação óptica, é constituída de cabo óptico dielétrico auto-sustentado com 24 fibras monomodo, operando na janela 1550nm, em instalação aérea, conforme resolução 299 da Anatel, em bobina única sem emendas, com comprimento total aproximado de 5000 m. Esses cabos ópticos transmitem comprimentos de onda entre 1530 nm a 1565 nm (Banda C), interligando equipamentos DWDM, operando em taxas de transmissão de 2.5 a 10 Gbps; instalados nas terminações dos enlaces de cada localidade.

O lançamento do cabo óptico dielétrico auto-sustentado entre a sala de telecomunicações do prédio da Eletronorte e o prédio do Governo do Pará / PRODEPA, é de DGO à DGO, em cada uma das cidades. O lançamento do cabo óptico dielétrico interliga o DGO da sala de telecomunicações da Eletronorte ao DGO da sala de telecomunicações do Governo do Pará / PRODEPA, nas edículas

localizadas em cada uma das cidades. A fibra óptica monomodo (SM) tem as seguintes características:

- ✓ Comprimento de onda entre 1530 e 1565 nm (Banda C);
- ✓ Modo de propagação: monomodo;
- ✓ Uniformidade de atenuação em 1550 nm: 0,22 dB/km;
- ✓ Dispersão cromática em 1550 nm: 18 Ps/(nm*km);
- ✓ Medidas de PMD para transmissão em 10 Gbps: <0,5 ps/km
- ✓ Revestimento primário: acrilato;
- ✓ Diâmetro do revestimento primário: $250 \pm 10 \mu\text{m}$;
- ✓ Diâmetro do revestimento secundário (se houver): entre 400 e 900 μm ;
- ✓ Diâmetro do núcleo: $8,3 \pm 1 \mu\text{m}$;
- ✓ Diâmetro da casca: $125 \pm 2 \mu\text{m}$;
- ✓ Excentricidade: 1 μm ;
- ✓ Tensão constante mecânica (proof-test): $\geq 0,70 \text{ GPA}$;
- ✓ Atenuação uniformemente distribuída ao longo do seu comprimento, de modo a não existir pontos de descontinuidade;
- ✓ Atenuação das fibras enroladas com 100 voltas em torno de um mandril de 75 mm de diâmetro; deverá ser inferior ou igual a 0,1 dB, em 1550 nm;
- ✓ Deverão manter integridade óptica e mecânica quando expostas à temperaturas operacionais extremas: -10°C a +65°C.

3.5 – Resultado das Simulações Realizadas no Sistema Navega Pará: Backbone Óptico DWDM / SDH STM -16

O *backbone* óptico do sistema é formado pelos trechos Marabá – Santa Maria; Tucuruí – Rurópolis; Rorópolis – Itaituba, e Rurópolis – Santarém. Na figura 3.2 foi apresentada a topologia da rede óptica DWDM e SDH (STM -16), incluindo as distâncias entre as estações.

Em função das distâncias entre as estações, existem diferentes atenuações do sinal óptico ao longo da fibra óptica. Para compensar esta atenuação, são utilizados amplificadores na saída de transmissão, e em alguns casos é necessária a utilização de pré - amplificadores, para que o nível do sinal na entrada do receptor seja suficiente para sensibilizar o detector de sinal óptico na recepção.

Para linhas muito longas, há problema de atraso para diferentes comprimentos de onda, devido o fenômeno da dispersão cromática. Para compensar este inconveniente de propagação em algumas estações, pode-se utilizar o módulo compensador de dispersão. Para obter custos menores, na estação de Jacundá, não é feita a regeneração do sinal óptico, evitando-se a multiplexação e a demultiplexação do sinal. Assim, é utilizado um equipamento passivo (OADM – Optical Add and Drop Multiplexer) para retirada e inserção de alguns comprimentos de onda, sendo os demais apenas amplificados. Canais de supervisão permitem o gerenciamento dos equipamentos; assim como, proveem facilidades de comunicação para a manutenção.

O *backbone* óptico atende as necessidades de circuitos do Estado do Pará, e é composto por sistema DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) e sistema SDH (*Synchronous Digital Hierarchy* – STM16 - 2,5 Gbps); e foi implantado no Estado, ao longo das linhas de transmissão, nas localidades próximas das subestações e repetidoras da Eletronorte.

O sistema DWDM na direção Marabá - Santa Maria terá uma capacidade final de oito lambdas (canais) de 2,5 Gbit/s, e capacidade inicial de cinco lambdas (canais) de 2,5 Gbit/s; sendo quatro canais disponíveis para tráfego em geral; e

um canal para transporte do SDH (STM-16). Futuramente, será expandido para oito lambdas (canais) de 10 Gbit/s.

Para o sistema DWDM na direção Tucuruí – Rurópolis, a capacidade final será de oito lambdas (canais) de 2,5 Gbps; e capacidade inicial de cinco lambdas (canais) de 2,5 Gbps; sendo quatro canais disponíveis para tráfego em geral, e um canal, para transporte do SDH (STM-16). Quanto às direções Rurópolis – Santarém e Rurópolis – Itaituba; o sistema DWDM terá uma capacidade final de cinco lambdas (canais) de 2,5 Gbit/s, e capacidade inicial de três lambdas (canais) de 2,5 Gbit/s; sendo dois canais disponíveis para tráfego em geral, e um canal para transporte do SDH (STM-16). O sistema SDH STM – 16 suprirá a necessidade de canalização inferior a 2,5 Gbit/s.

O orçamento de potência para os enlaces acima mencionados está dimensionado para a transmissão / recepção final dos respectivos lambdas. Os equipamentos DWDM atuam na banda C (1530 nm a 1565 nm), assim como também os equipamentos OADM; que por sua vez, são equipados com dois lambdas.

Nos itens que se seguem, são mostrados os respectivos layouts dos trechos referentes à Marabá – Santa Maria; Tucuruí – Rurópolis; Rurópolis – Itaituba; Rurópolis – Santarém e Belém - Prodepa; assim como também, os respectivos resultados, quanto a OSNR e os diagramas de olho e BER dos enlaces mencionados acima, e que constituem o *backbone* óptico.

3.5.1 – Trecho Marabá – Santa Maria para oito canais DWDM de 10 Gbit/s

A Figura 3.8 mostra o *layout* do trecho Marabá - Santa Maria, que foi utilizado no software de simulação optisystem 4.1™; e a Tabela 3.3 mostra os valores de atenuação e distância do trecho Marabá – Santa Maria. A Tabela 3.4 apresenta os valores da BER e OSNR de cada canal, na saída do demux, que são os resultados das simulações realizadas.

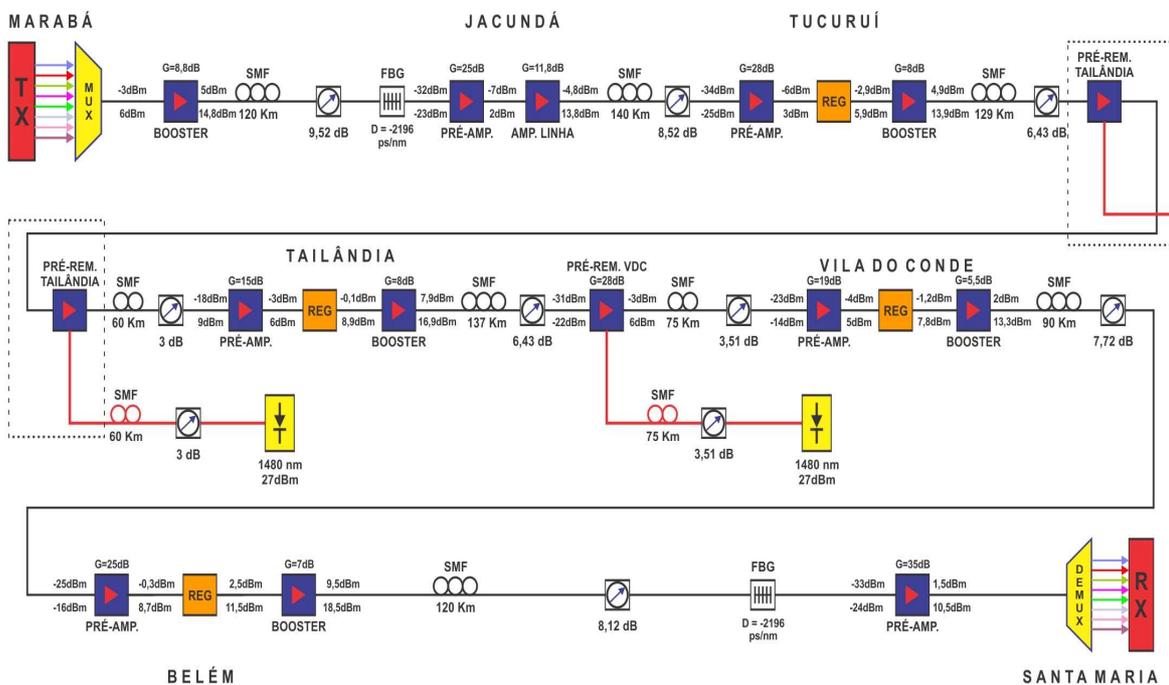


Figura 3.8 - Layout do trecho Marabá – Santa Maria, para oito canais DWDM de 10 Gb/s.

Trecho	Atenuação total do link (dB)	Distância (Km)
Santa Maria do Pará / Belém	34,52	120
Belém / Prodepa	9,08	20
Belém / Vila do Conde	27,32	90
Vila do Conde / Tailândia	56,59	212
Tailândia / Tucuruí	51,07	189
Tucuruí / Jacundá	30,32	140
Jacundá / Marabá	34,52	120

Tabela 3.3 - Valores de atenuação e distâncias do trecho Marabá – Santa Maria.

CANAL	FREQUÊNCIA (THz)	OSNR (dB)	BER
1	192,1 THz	20,8	$9,5 \times 10^{-14}$
2	192,3 THz	21,2	$3,3 \times 10^{-18}$
3	192,5 THz	21,0	$5,2 \times 10^{-15}$
4	192,7 THz	21,2	$4,7 \times 10^{-16}$
5	192,9 THz	21,0	$3,9 \times 10^{-15}$
6	193,1 THz	21,0	$1,0 \times 10^{-12}$
7	193,3 THz	22,4	$1,4 \times 10^{-15}$
8	193,5 THz	20,9	$1,8 \times 10^{-16}$

Tabela 3.4 – Valores da BER e OSNR para cada canal na recepção, na saída do demultiplexador, para oito canais de 10 Gbit/s (Marabá – Santa Maria).

Os diagramas da BER e os diagramas de olho; de cada canal, podem ser visualizados nas Figuras de 3.9a até 3.9h.

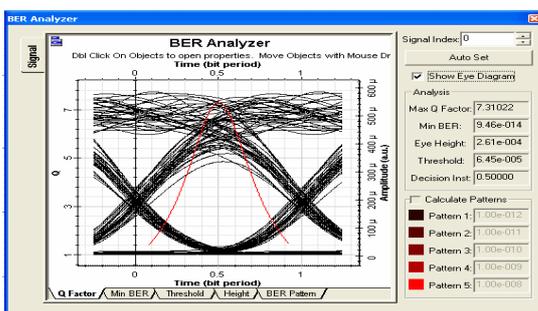


Figura 3.9a - Diagrama de Olho e BER do C 1.

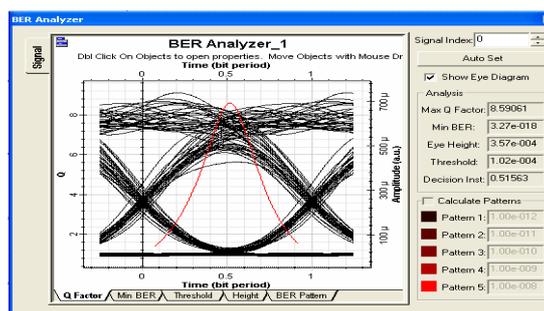


Figura 3.9b - Diagrama de Olho e BER do C 2

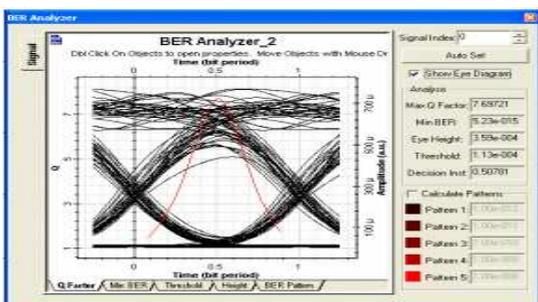


Figura 3.9c - Diagrama de Olho e BER do C 3

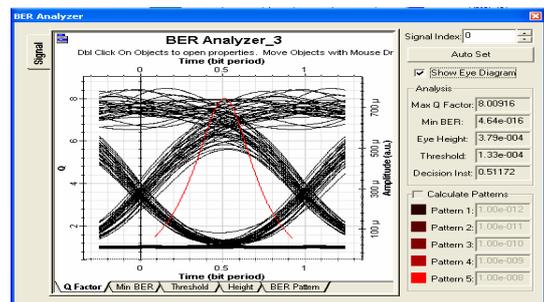


Figura 3.9d - Diagrama de Olho e BER do C 4

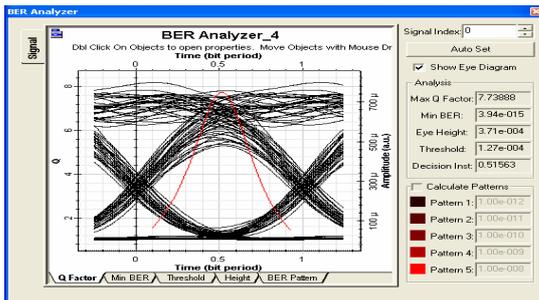


Figura 3.9e - Diagrama de Olho e BER do C 5

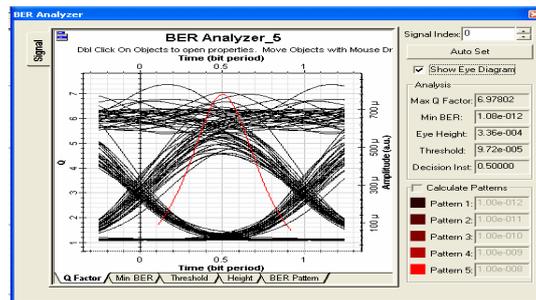


Figura 3.9f - Diagrama de Olho e BER do C 6

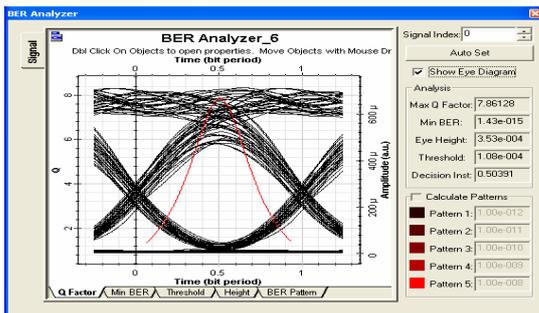


Figura 3.9g - Diagrama de Olho e BER do C 7

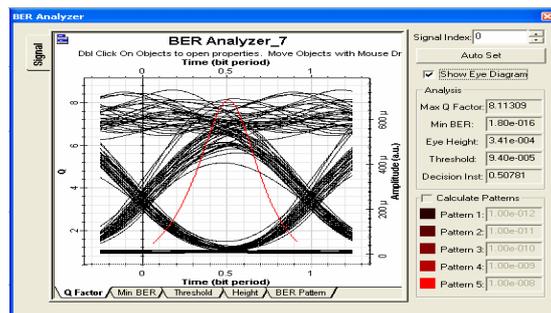


Figura 3.9h - Diagrama de Olho e BER do C 8

Figura 3.9 - Diagramas de olho e BER dos oito canais DWDM a 10 Gbit/s, do trecho Marabá – Santa Maria.

3.5.2 – Trecho Tucuruí – Rurópolis (Tramo Oeste) para oito canais DWDM de 2,5 Gb/s

O sistema óptico do Tramo Oeste é composto por uma rede óptica cuja extensão total do enlace de Tucuruí até Rurópolis, são de 731 Km; utilizando fibra óptica monomodo padrão SMF (SMF – 28) em cabo OPGW, e apresenta coeficiente de dispersão $D = 18 \text{ ps}/(\text{nm.Km})$ e coeficiente de atenuação de 0,22 dB/Km, janela de operação na banda C (1550 nm). O comprimento dos vãos é de aproximadamente 500 m e as caixas de emendas ópticas apresentam distâncias que variam entre si, cerca de 2 à 4 Km; apresentando perdas nas emendas de 0,01 dB. Considerou-se a distância de 2 Km entre as caixas de emenda, para o pior caso; e as perdas devido às emendas foram levados em consideração; quando da realização da simulação. Quando da implantação e comissionamento do sistema óptico em 1998, não foram realizadas as medidas de PMD; assim sendo, foi adotado para efeito de simulação, o valor de 0,5 ps / Km para a PMD.

No sistema atual são usados amplificadores boosters de 21 dBm e transponder CDWM unidirecional com APD (Long-Haul); para melhorar a sensibilidade do equipamento SDH de recepção. Este transponder tem sensibilidade de - 42 dBm para sinais STM-1 com BER de 10^{-12} . As características atuais do sistema óptico do Tramo Oeste, quanto aos enlaces, distância e atenuações, são mostradas, na Figura 3.10.

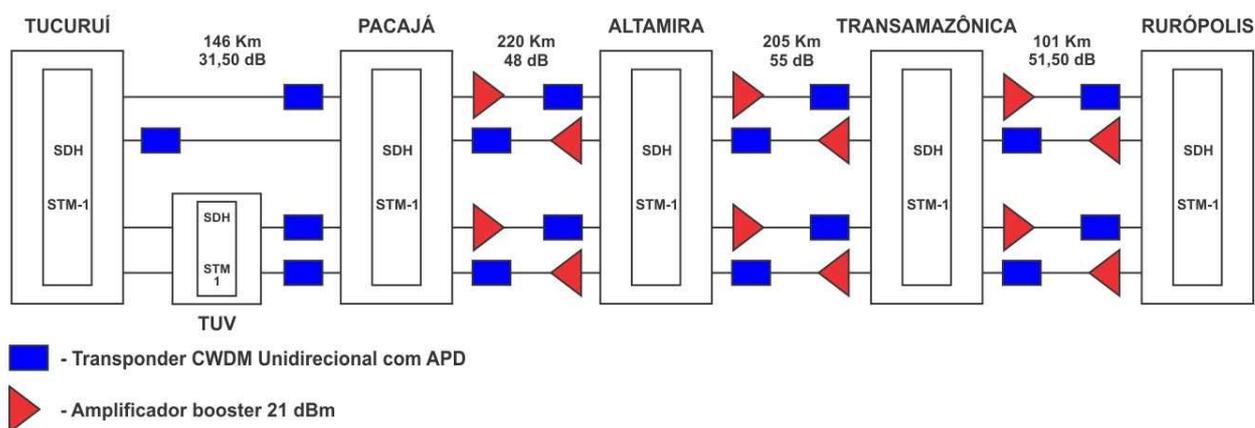


Figura 3.10 – Características atuais do sistema óptico do Tramo Oeste.

A Tabela 3.5 mostra as características do cabo OPGW (*Optical Ground Wire*), do sistema Tramo Oeste.

Características do cabo	Valores nominais	Unidade
Número de fibras ópticas	24	---
Diâmetro externo	14,5	mm
Peso	627	Kg / Km
Diâmetro mínimo de curvatura (instalação)	1600	mm
Tensão de ruptura nominal	9100	Kgf
Capacidade térmica	73	kA ² gf

Tabela 3.5 - Características do cabo OPGW (Optical Ground Wire) do Sistema Tramo Oeste.

O sistema de linhas de transmissão do Oeste do Pará (Tramo Oeste) é apresentado na Figura 3.11. A repetidora de Pacajá que não aparece nesta figura; é mostrado no *layout* da figura 3.12.

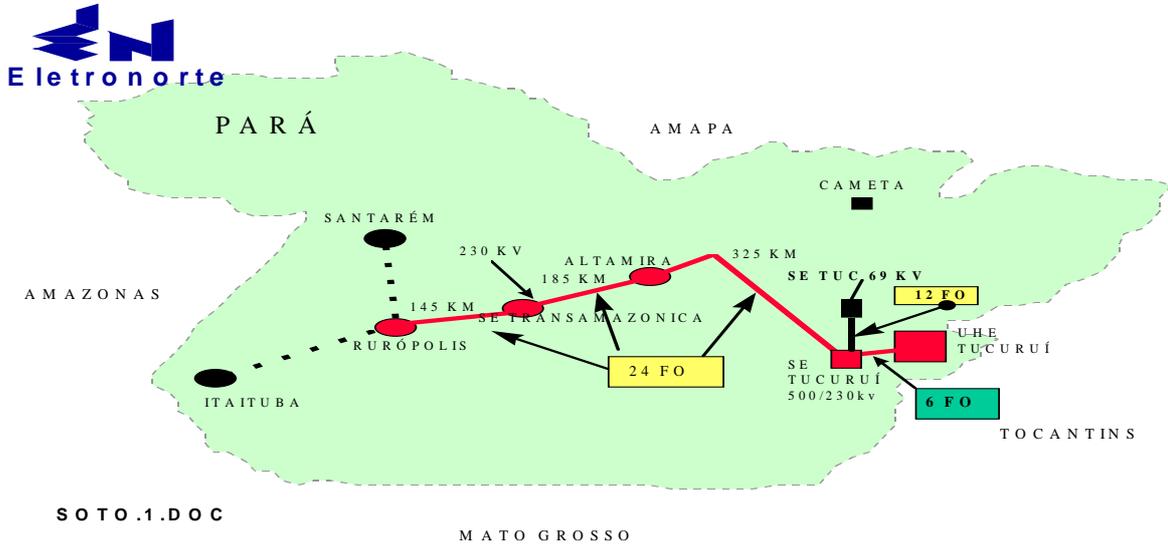
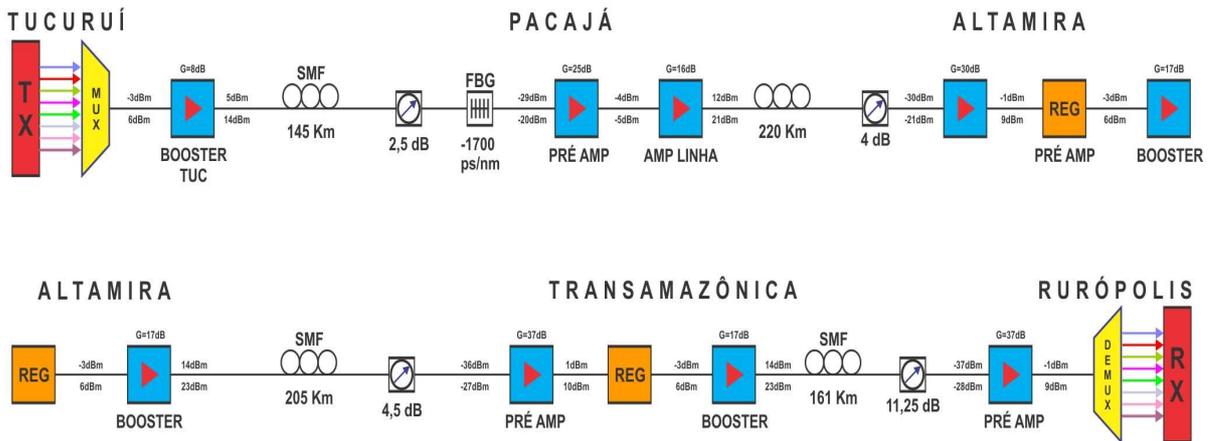


Figura 3.11 – Configuração do sistema de linhas de transmissão do Tramo Oeste.

A Figura 3.12 mostra o *layout* do trecho Tucuruí - Rurópolis, que foi utilizado no software de simulação optisystem 4.1™.



Figur 3.12 – Layout do trecho Tucuruí – Rurópolis (Tramo Oeste) para oito canais DWDM de 2,5 Gb/s.

A Tabela 3.6 mostra os valores de atenuação e as distâncias do trecho Tucuruí – Rurópolis; e a Tabela 3.7 apresenta os valores da BER e OSNR de cada canal, na saída do demultiplexador, que são os resultados das simulações realizadas.

Trecho	Atenuação total do link (dB)	Distância (Km)
Tucuruí - Pacajá	31,50	145
Pacajá - Altamira	48,00	220
Altamira - Uruará	55,00	205
Uruará - Rurópolis	51,50	161

Tabela 3.6 - Valores de atenuação e distâncias do trecho Tucuruí – Rurópolis.

CANAL	FREQUÊNCIA (THz)	OSNR (dB)	BER
1	192,1	18,33	$1,57 \times 10^{-37}$
2	192,3	18,76	$3,9 \times 10^{-45}$
3	192,5	17,16	$3,79 \times 10^{-35}$
4	192,7	17,21	$1,18 \times 10^{-35}$
5	192,9	16,95	$6,77 \times 10^{-30}$
6	193,1	18,19	$2,55 \times 10^{-28}$
7	193,3	16,30	$3,73 \times 10^{-23}$
8	193,5	16,03	$1,53 \times 10^{-28}$

Tabela 3.7 - Valores da BER e OSNR para cada canal na recepção, na saída do demultiplexador, para oito canais de 2,5 Gbit/s (Tucuruí – Rurópolis: Tramo Oeste).

Os diagramas da BER e os diagramas de olho de cada canal; podem ser visualizados nas Figuras de 3.13a até 3.13h.

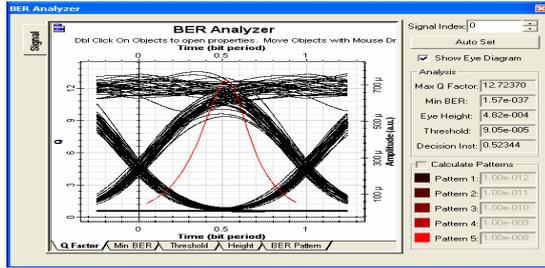


Figura 3.13a - Diagrama de Olho e BER do C 1

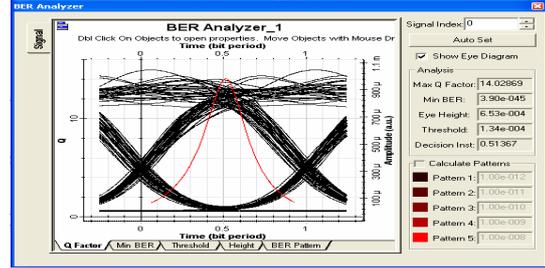


Figura 3.13b - Diagrama de Olho e BER do C 2

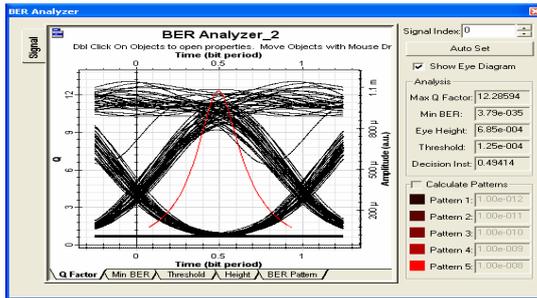


Figura 3.13c - Diagrama de Olho e BER do C 3

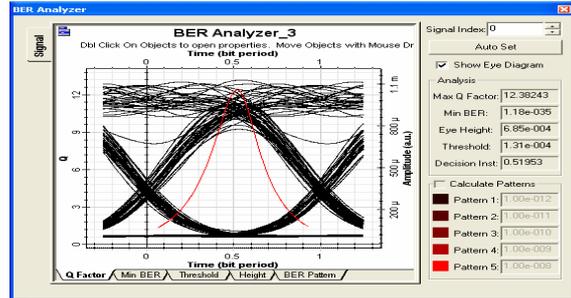


Figura 3.13d - Diagrama de Olho e BER do C 4

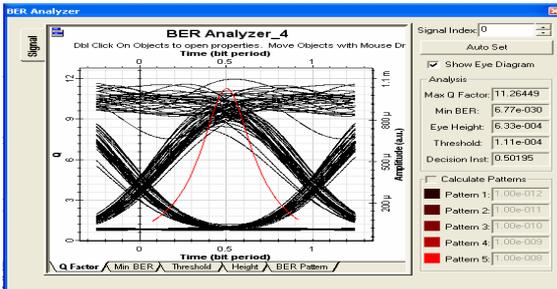


Figura 3.13e - Diagrama de Olho e BER do C 5

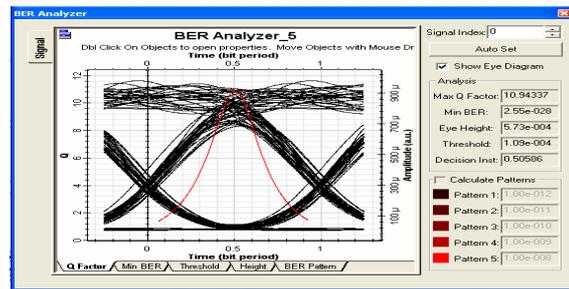


Figura 3.13f - Diagrama de Olho e BER do C 6

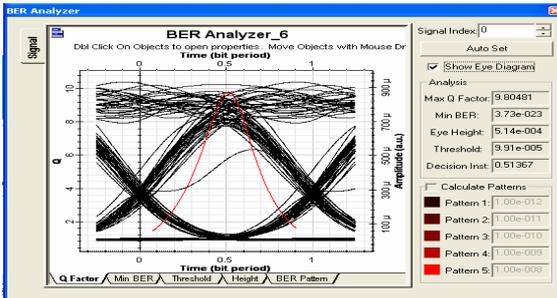


Figura 3.13g - Diagrama de Olho e BER do C 7

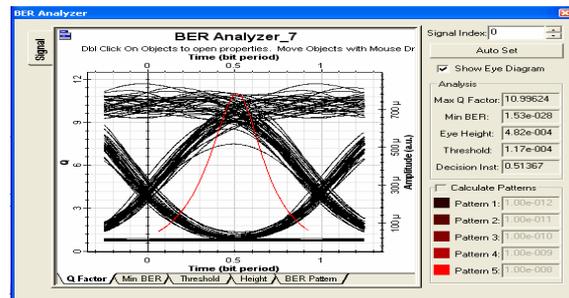


Figura 3.13h - Diagrama de Olho e BER do C 8

Figura 3.13 - Diagramas de olho e BER dos oito canais DWDM a 2,5 Gbit/s, do trecho Tucuruí – Rurópolis (Tramo Oeste).

3.5.3 – Trecho Rurópolis – Itaituba para cinco canais DWDM de 2,5 Gb/s

A Figura 3.14 mostra o layout do trecho Rurópolis - Itaituba, que retrata o esquema usado na simulação, por meio do software optisystem 4.1™. A atenuação do trecho Rurópolis – Itaituba é 44,12 dB.

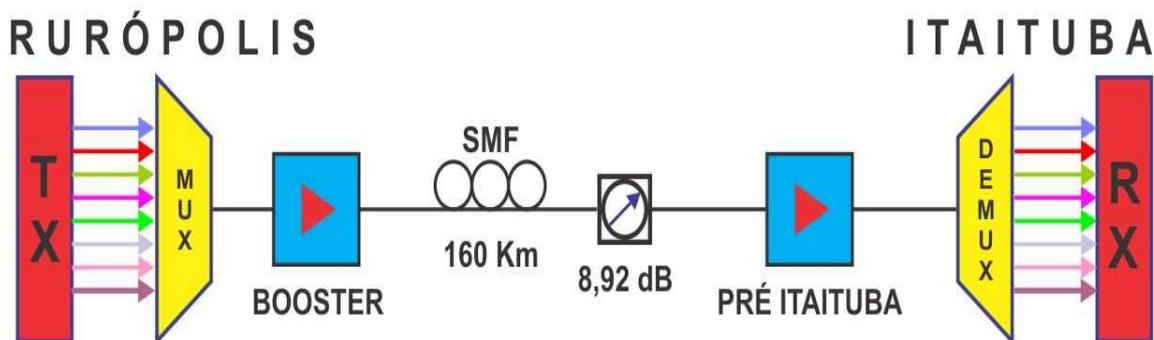


Figura 3.14 – Layout do trecho Rurópolis - Itaituba, para cinco canais DWDM de 2,5 Gb/s.

Resultados do trecho Rurópolis – Itaituba para cinco canais DWDM de 2,5 Gb/s. A Tabela 3.8 apresenta os valores das OSNRs e BER de cada canal, na saída do demultiplexador; que são os resultados das simulações realizadas.

CANAL	FREQUÊNCIA (THz)	OSNR (dB)	BER
1	192,1	23,4	$3,9 \times 10^{-84}$
2	192,3	23,6	$5,2 \times 10^{-124}$
3	192,5	22,1	$1,6 \times 10^{-97}$
4	192,7	22,2	$3,8 \times 10^{-79}$
5	192,9	22,0	$3,8 \times 10^{-95}$

Tabela 3.8 - Valores da BER e OSNR para cada canal na recepção, na saída do demultiplexador, para cinco canais de 2,5 Gbit/s (Rurópolis – Itaituba).

Os diagramas da BER e os diagramas de olho; de cada canal, podem ser visualizados nas Figuras de 3.15a até 3.15h.

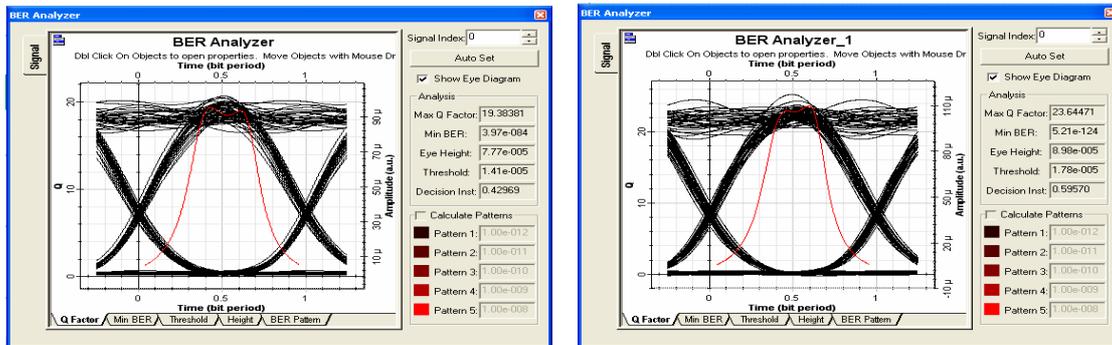


Figura 3.15a - Diagrama de Olho e BER do C 1 Figura 3.15b - Diagrama de Olho e BER do C 2

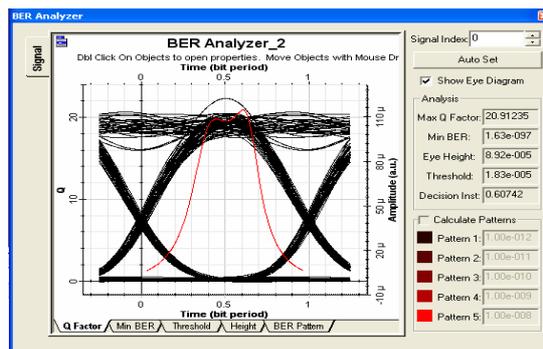


Figura 3.15c - Diagrama de Olho e BER do C 3

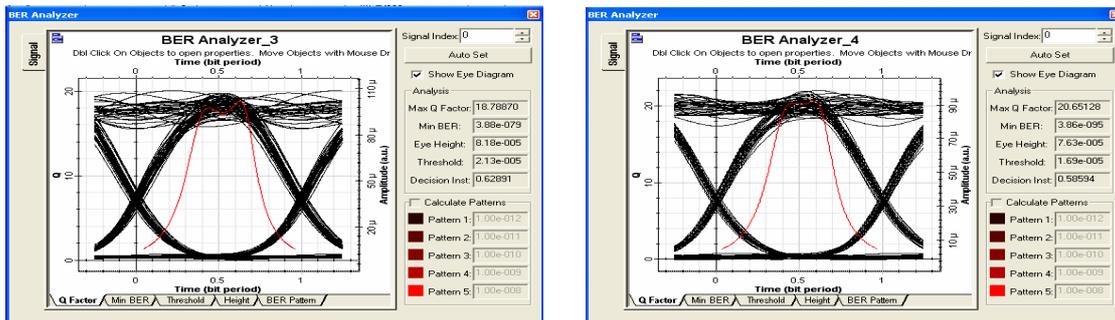


Figura 3.15d - Diagrama de Olho e BER do C 4 Figura 3.15e - Diagrama de Olho e BER do C 5

Figura 3.15 - Diagramas de olho e BER dos cinco canais DWDM a 2,5 Gbit/s, do trecho Rurópolis - Itaituba.

3.5.4 – Trecho Rurópolis - Santarém para cinco canais DWDM de 2,5 Gb/s

Conforme mostrado na Figura 3.16, foi utilizado um laser de 0,25 W para bombeamento da fibra de transmissão, a partir do lado da recepção; para amplificação Raman distribuída. A atenuação do trecho Rurópolis – Santarém é 58,51dB.

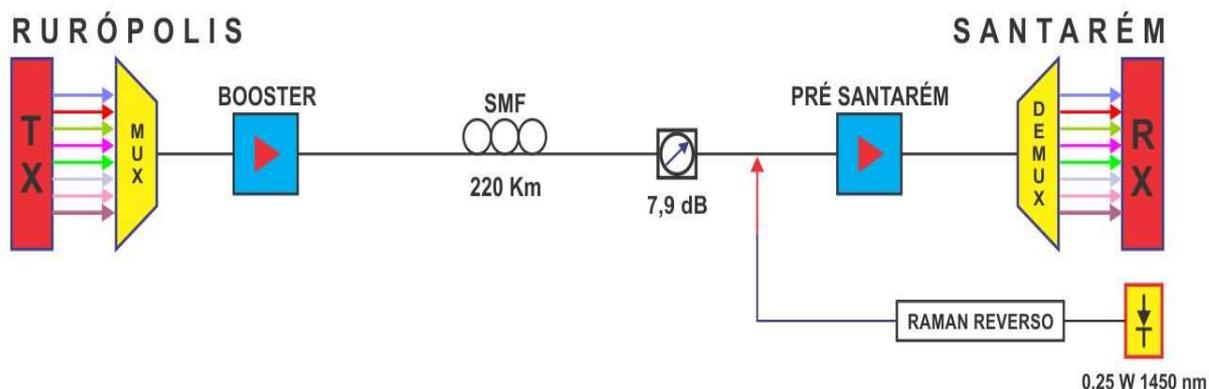


Figura 3.16 – Layout do trecho Rurópolis - Santarém, para cinco canais DWDM de 2,5 Gb/s.

Resultados do trecho Rurópolis – Santarém para cinco canais DWDM de 2,5 Gb/s. A Tabela 3.9 apresenta os valores das OSNRs e BER de cada canal, na saída do demultiplexador; que são os resultados das simulações realizadas.

CANAL	FREQUÊNCIA (THz)	OSNR (dB)	BER
1	192,1	18,6	$1,66 \times 10^{-86}$
2	192,3	19,1	$2,76 \times 10^{-90}$
3	192,5	17,6	$3,71 \times 10^{-71}$
4	192,7	17,7	$6,53 \times 10^{-70}$
5	192,9	17,7	$2,17 \times 10^{-75}$

Tabela 3.9 - Valores da BER e OSNR para cada canal na recepção, na saída do demultiplexador, para cinco canais de 2,5 Gbit/s (Rurópolis – Santarém).

Os diagramas da BER e os diagramas de olho de cada canal; podem ser visualizados nas Figuras a seguir, de 3.17a até 3.17e.

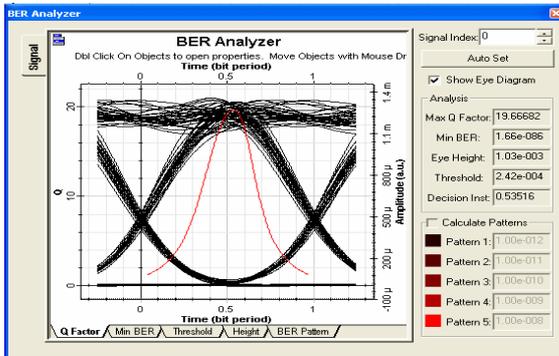


Figura 3.17a- Diagrama de Olho e BER do C 1

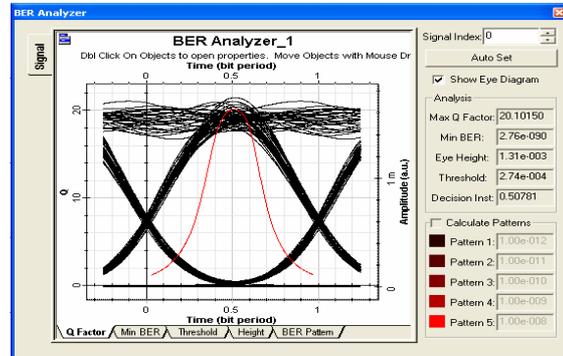


Figura 3.17b - Diagrama de Olho e BER do C 2

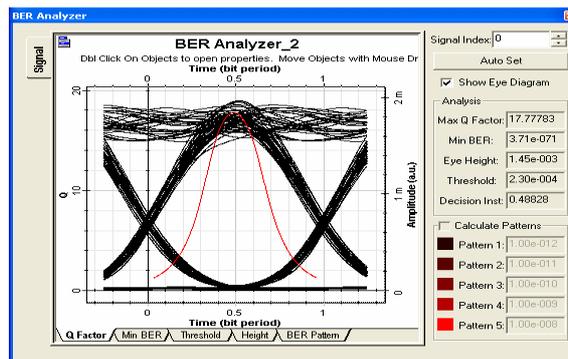


Figura 3.17c - Diagrama de Olho e BER do C 3

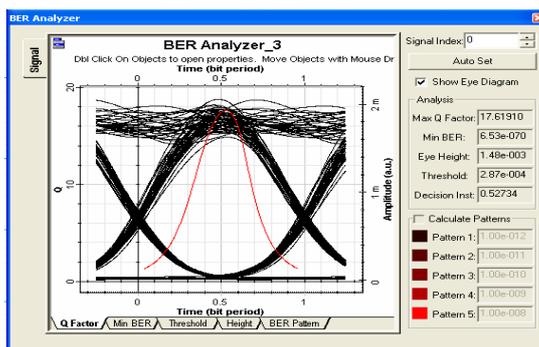


Figura 3.17d - Diagrama de Olho e BER do C4

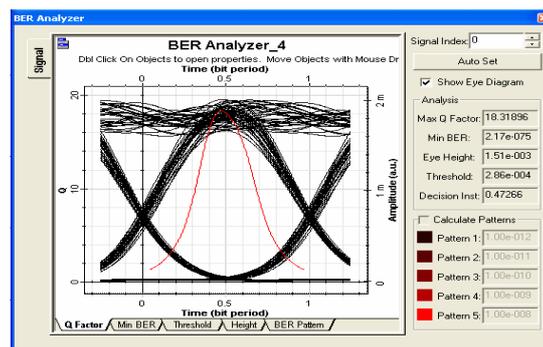


Figura 3.17e - Diagrama de Olho e BER do C 5

Figura 3.17 - Diagramas de olho e BER dos cinco canais DWDM a 2,5 Gbit/s, do trecho Rurópolis – Santarém.

3.5.5 – Trecho Belém – Prodepa, para oito canais DWDM de 2,5 Gb/s

A Figura 3.18 mostra o layout do trecho Belém – Prodepa, que retrata o esquema usado na simulação, por meio do software optisystem 4.1™. A atenuação do trecho Belém – Prodepa é 9,08 dB.

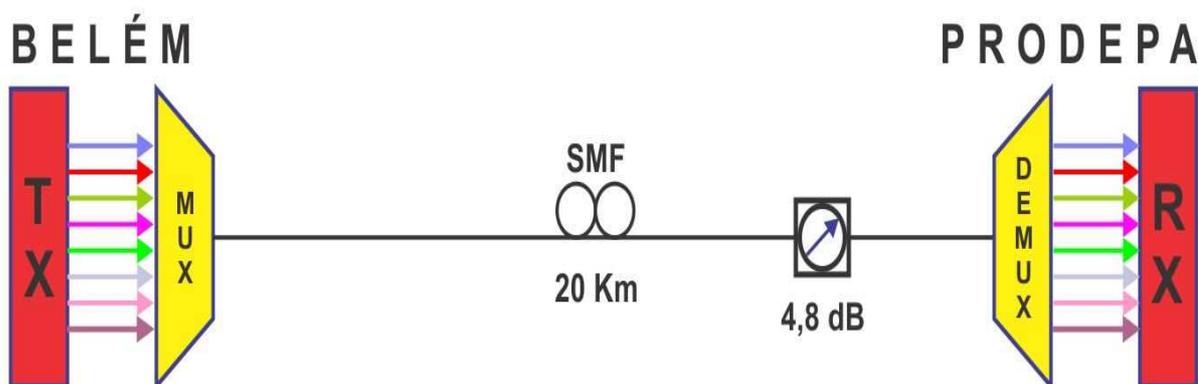


Figura 3.18 – Layout do trecho Belém – Prodepa, para oito canais DWDM de 2,5 Gb/s.

A Tabela 3.10 apresenta os valores da BER e OSNR de cada canal, na saída do demux; que são os resultados das simulações realizadas.

CANAL	FREQUÊNCIA (THz)	OSNR (dB)	BER
1	192,1	81,9	$5,8 \times 10^{-95}$
2	192,3	81,8	$1,0 \times 10^{-88}$
3	192,5	81,8	$3,5 \times 10^{-96}$
4	192,7	81,8	$2,7 \times 10^{-100}$
5	192,9	81,8	$6,4 \times 10^{-97}$
6	193,1	81,8	$4,6 \times 10^{-96}$
7	193,3	81,8	$2,6 \times 10^{-72}$
8	193,5	81,9	$2,2 \times 10^{-95}$

Tabela 3.10 – Valores da BER e OSNR para cada canal na recepção, na saída do demultiplexador, para oito canais de 2,5 Gbit/s (Belém – Prodepa).

Os valores da BER e os diagramas de olho de cada canal; podem ser visualizados nas figuras de 3.19a até 3.19h.

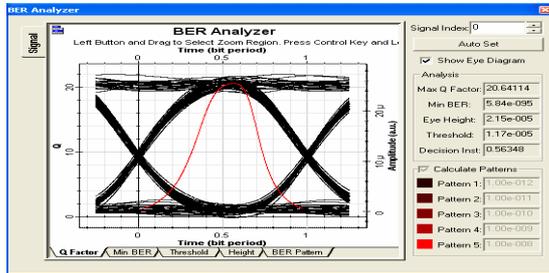


Figura 3.19a - Diagrama de Olho e BER do C 1

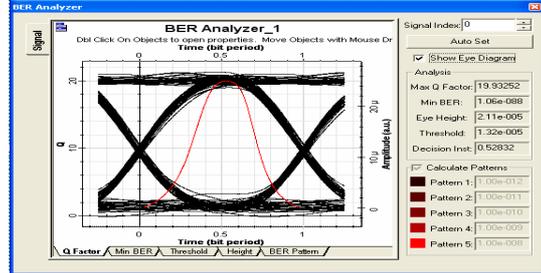


Figura 3.19b - Diagrama de Olho e BER do C 2

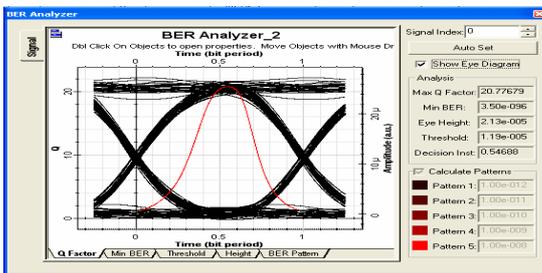


Figura 3.19c - Diagrama de Olho e BER do C 3

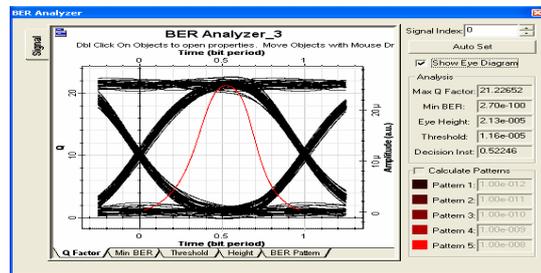


Figura 3.19d - Diagrama de Olho e BER do C 4

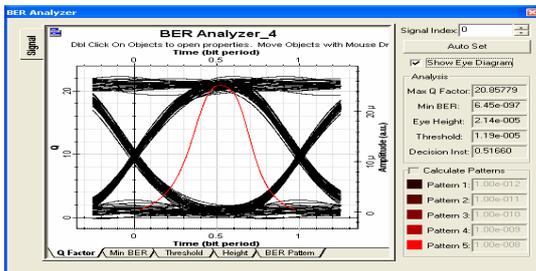


Figura 3.19e - Diagrama de Olho e BER do C 5

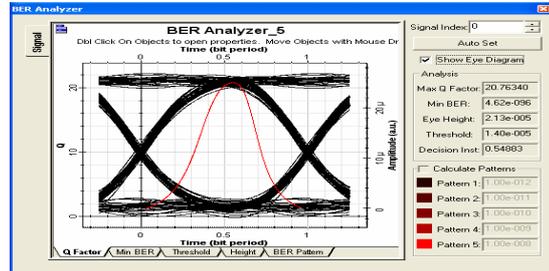


Figura 3.19f - Diagrama de Olho e BER do C 6

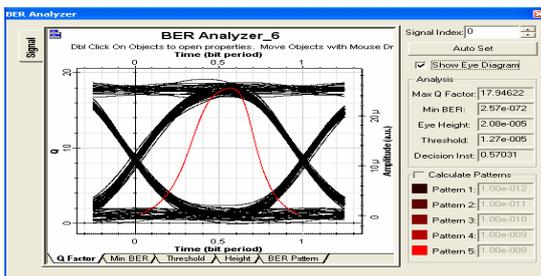


Figura 3.19g - Diagrama de Olho e BER do C 7

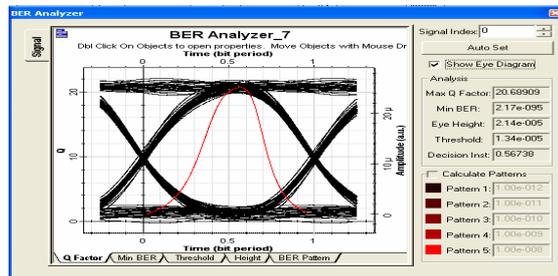


Figura 3.19h - Diagrama de Olho e BER do C 8

Figura 3.19 - Diagramas de olho e BER dos oito canais DWDM a 2,5 Gbit/s, do trecho Belém – Prodepa.

3.5.6 – Análise dos Resultados das Simulações Realizadas no Sistema Navega Pará

Para o backbone óptico, com tecnologia DWDM e SDH – STM 16, implantado no Estado do Pará, nas linhas de transmissão e localidades próximas às subestações e repetidoras da Eletronorte, foram realizadas as simulações baseadas nos valores de atenuação e dispersão, calculados com base no descrito no item 3.3.1 (dimensionamento do sistema óptico da especificação técnica PA-GER-COP-102-ET, revisão 04); onde, no cálculo da atenuação do sistema; considerou-se a margem de segurança de 3 dB.

De acordo com a especificação técnica PA-GER-COP-0102-ET, revisão 4, referente ao backbone (rota de longa distância) óptico DWDM – 2,5 Gbps / SDH 16 para atendimento ao Governo do Pará, anexo III – Termo de Referência; o objetivo do dimensionamento do sistema óptico é determinar a faixa dinâmica do mesmo, para uma BER menor ou igual que 10^{-10} , e a máxima dispersão cromática de 18 ps/nm por km da fibra óptica em 1550 nm multiplicada pelo comprimento da via óptica.

O sistema DWDM, opera com espaçamento de 200 GHz (1,8 nm) entre canais adjacentes. Todos os orçamentos de potência para o projeto de rede DWDM foram de acordo com o item 3.3.12 da seção III da Especificação Técnica PA-GER-COP-0102-ET, revisão 4. Os níveis de potência óptica adotados nestes orçamentos são tais, que garantem uma relação sinal / ruído óptica (OSNR) maior ou igual a 16 dB; adequada ao transporte de sinais a 2,5 Gb/s sem erros, e com margem sistêmica adequada. Portanto, as simulações foram baseadas nos dados do projeto; onde, para o projeto de rede, foram utilizadas as regras de dimensionamento apresentadas no item 3.3.12 da Especificação Técnica, com exceção dos trechos Tucuruí – Pacajá; Pacajá – Altamira; Altamira – Uruará; e Uruará – Rurópolis, para os quais foram utilizados os valores medidos apresentados na Tabela 3.1. A Tabela 3.1 apresentou os valores de distância, atenuação e dispersão cromática utilizados no projeto, onde a margem de segurança utilizada foi de 3 dB; como já mencionado acima (requisito do edital). A

Tabela 3.11 apresenta o plano de freqüências e comprimentos de onda [33], utilizados no sistema DWDM.

Canal	Freqüência (THz)	Lambda (nm)
C1	192,1	1560,61
C2	192,3	1559,79
C3	192,5	1558,98
C4	192,7	1558,17
C5	192,9	1557,36
C6	193,1	1556,55
C7	193,3	1555,75
C8	193,5	1554,94

Tabela 3.11 - Plano de freqüências e comprimentos de onda, utilizados no sistema DWDM.

Pelo descrito acima, observa-se que a OSNR exigida, teria que ser igual ou maior que 16 dB. De acordo com os resultados das simulações realizadas para o sistema Navega Pará, com backbone óptico DWDM – 2,5 Gb/s / SDH STM – 16; para os respectivos trechos: Marabá – Santa Maria; Tucuruí – Rurópolis; Rurópolis – Itaituba; Rurópolis – Santarém e Belém – Prodepa, observou-se que os resultados das simulações foram satisfatórios; por apresentarem resultados de OSNR igual ou maior a 16 dB, atendendo assim, aos requisitos exigidos, nas especificações técnicas. O sistema óptico apresenta flexibilidade de capacidade, transparência para sinais transmitidos, permissão de crescimento gradual da capacidade, e atendimento de demanda esperada. O DWDM amplia a capacidade de transmissão da fibra.

Nesse sistema DWDM, os sinais a serem transmitidos nos diferentes comprimentos de onda podem possuir formatos e taxas de bit diferentes, promovendo uma maior transparência aos sistemas de transporte. Além disso, apresenta flexibilidade de capacidade; ou seja, migrações de 622 Mbps para 2,5 Gbps poderão ser realizadas sem a necessidade de se trocar os equipamentos. O sistema DWDM permite ainda o crescimento da capacidade de transmissão; basta apenas adicionar mais canais.

CAPÍTULO 4 – NOVA PROPOSTA PARA EXPANSÃO POR WDM, E UTILIZANDO BOMBEIO REMOTO EM AMPLIFICADORES ÓPTICOS, E EFEITO RAMAN.

4.1 – Introdução

Essa nova proposta visa a expansão da capacidade de transmissão por WDM, e eliminação das estações repetidoras de Pacajá no sistema Tramo Oeste, e Jacundá no sistema Pará – Maranhão; através de implantação de estações sem repetição, utilizando bombeamento remoto; onde a regeneração O.E.O, é substituída por amplificadores ópticos. Para sistemas WDM de altas taxas, este tipo de processo torna-se muito caro e complexo [25]; assim sendo, é preciso que a rede tenha amplificação totalmente óptica; isto é, que utilize somente amplificadores ópticos que forneçam amplificação óptica multicanal. Para isso, foram efetuadas simulações com a finalidade de analisar a limitação dos respectivos sistemas, devido à atenuação e a dispersão.

4.2 – Proposta de Mudanças no Sistema Óptico do Tramo Oeste

Para aumentar a capacidade de transmissão de sistemas ópticos, é necessário utilizar a tecnologia WDM (*Density Wavelength Division Multiplexing*); aliado a isso, é também utilizado a amplificação totalmente óptica. Para tanto, a proposta apresentada, é a utilização de amplificadores ópticos passivos à fibra dopada com érbio (EDFA) em sistemas de comunicação óptica de longa distância. Esta solução é a utilização de amplificadores ópticos com bombeamento remoto, por meio das fibras ópticas do cabo OPGW já instalado, em sistemas ópticos de comunicação, tornando-se assim, sistemas de comunicações ópticos de longa distância sem estação de repetição, o que vem proporcionar; quando comparado à instalação, operação e manutenção das estações repetidoras; hoje instaladas ao longo dos trechos, uma grande redução de custos. Além do mais, os referidos amplificadores ópticos, bombeados remotamente, utilizam somente componentes

passivos, e podem ser instalados ou acomodados em caixas de emendas ópticas, que se posicionam nas torres de linhas de transmissão. Por outro lado, as fontes utilizadas para o bombeamento remoto, por sua vez, ficam localizadas e também alimentadas nas estações terminais, ou seja, nas estações transmissoras e receptoras locais. O projeto e simulação do sistema óptico do Tramo Oeste, é sem a estação repetidora de Pacajá, no trecho entre a subestação de Tucuruí e a subestação de Altamira; ou seja, sendo a estação repetidora, substituída por bombeamento remoto, e também, bombeamento remoto no trecho entre a subestação de Altamira e a subestação Transamazônica. As simulações foram efetuadas para oito canais WDM à taxa de 2,5 Gb/s.

4.3 - Projeto dos Amplificadores Ópticos

Embora o software optisystem 4.1™ contenha em sua biblioteca de componentes, amplificadores ideais, cujo ganho é planar em toda a faixa do espectro; em que se precisa apenas configurar seus valores de ganho e figura de ruído, optou-se por projetar amplificadores mais realísticos para sistemas WDM, cujo ganho é variável com o comprimento de onda.

Foram projetados os pós e os pré - amplificadores bombeados remotamente e amplificadores locais; baseados em amplificadores a fibra dopada com érbio (EDFA) que são os tipos de amplificadores utilizados para comprimentos de onda de 1530 nm a 1565 nm (banda C). O projeto desses amplificadores leva em conta, que eles atendem a um sistema WDM de oito canais, alocado nas frequências, conforme as recomendações padrões ITU-T G.692, para WDM. Houve uma preocupação em manter uma uniformidade do ganho na faixa dos respectivos canais. O nível da potência transmitida do booster em Tucuruí, para o sistema óptico WDM sem repetição do Tramo Oeste, para oito canais a 2,5 Gbit/s, foi de 16 dBm. O projeto dos amplificadores foi feito por meio de uma ferramenta de otimização a múltiplos parâmetros, existente no software optisystem. Essa ferramenta foi utilizada para otimizar o comprimento da fibra dopada com érbio e a potência do laser de bombeio para fornecer o ganho, a OSNR e a potência

desejada do sinal de saída, de acordo com a potência do sinal de entrada. Os pós-amplificadores com bombeios remotos, em linha, foram projetados para compensar exatamente a perda ocorrida no *span* anterior, mantendo a potência inicialmente transmitida pelo booster. Os pré-amplificadores com bombeios remotos foram projetados para transmitir a potência de saída desejada, para as respectivas simulações.

Utilizou-se para o pós e pré – amplificador com bombeio remoto, o esquema de bombeio unidirecional co-propagante de simples passagem, com lasers de bombeio de 1480 nm. Nos amplificadores locais (Subestação de Altamira e Subestação da Transamazônica), foi utilizado também o esquema de bombeio unidirecional co-propagante de simples passagem, com lasers de bombeio de 980 nm. Os valores das potências dos lasers de bombeios, assim como o comprimento da fibra dopada com érbio; foram obtidos através da ferramenta de otimização a múltiplos parâmetros disponibilizados pelo software optisystem.

4.4 – Nova Configuração Adotada

O sistema óptico sem repetição, como nova configuração adotada, é a interligação entre dois pontos distantes sem a utilização de equipamentos ao longo da rota entre estes dois pontos, ou entre outros tipos de ligações terrestres, onde não é de interesse existir sistemas alimentados eletricamente ao longo do trecho; como no caso de sistemas com repetidores, conforme ilustra a Figura 4.1 [34].

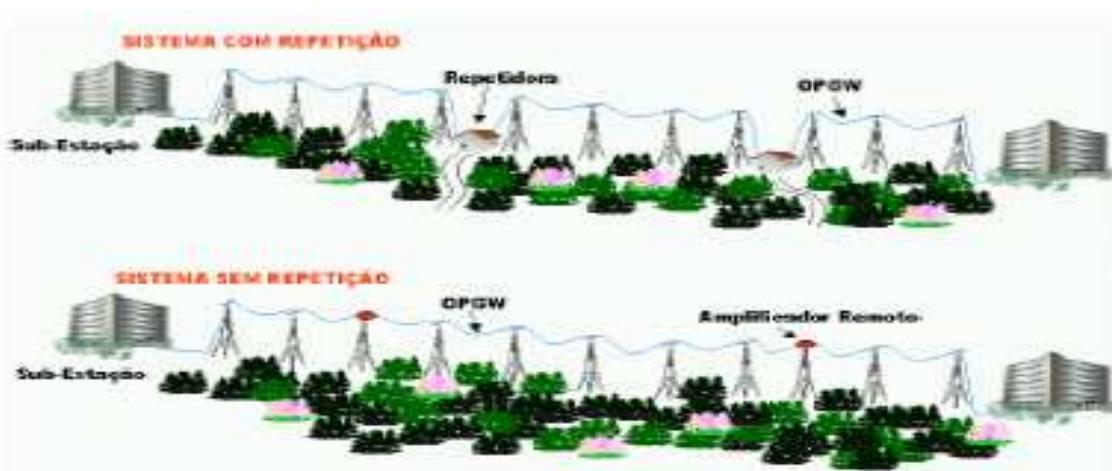


Figura 4.1 – Ilustração de um sistema óptico sem repetição.

É uma excelente alternativa, os sistemas sem repetição, quando o assunto em voga é reduzir custos de manutenção de sistemas ópticos de longa distância. Tais sistemas têm sido ao longo dos anos, bastante pesquisados e instalados hoje em dia. Neste trabalho, utiliza - se a tecnologia de amplificador óptico passivo a fibra dopada com érbio e bombeamento remoto [34]; e que passa a ser descrito a seguir.

4.4.1 – Amplificadores Ópticos com Bombeio Remoto na Transmissão

As fibras dopadas com érbio localizadas próximo ao transmissor [34]; permitem que se aumentem as distâncias a serem transmitidas; e, por operarem em saturação, equalizam possíveis flutuações da potência óptica. A melhoria no orçamento de potência é significativamente grande, e estes amplificadores são necessários para que se maximize a distância de transmissão.

As duas configurações mais comuns são vistas na Figura 4.2. A primeira; usa a fibra transmissora para bombear remotamente a fibra dopada, de modo que o bombeio é co-propagante com o sinal, conforme a Figura 4.2a. A segunda emprega uma fibra separada para prover o bombeio; como se vê na Figura 4.2b. Usando fibra transmissora do tipo DS, pode-se evitar o efeito não linear da instabilidade de modulação. Se a fibra de bombeio é o tipo “sílica pura”, o limiar do efeito Raman para esta fibra é o maior possível, o que implica em altos níveis de potência de bombeio lançadas nesta fibra.

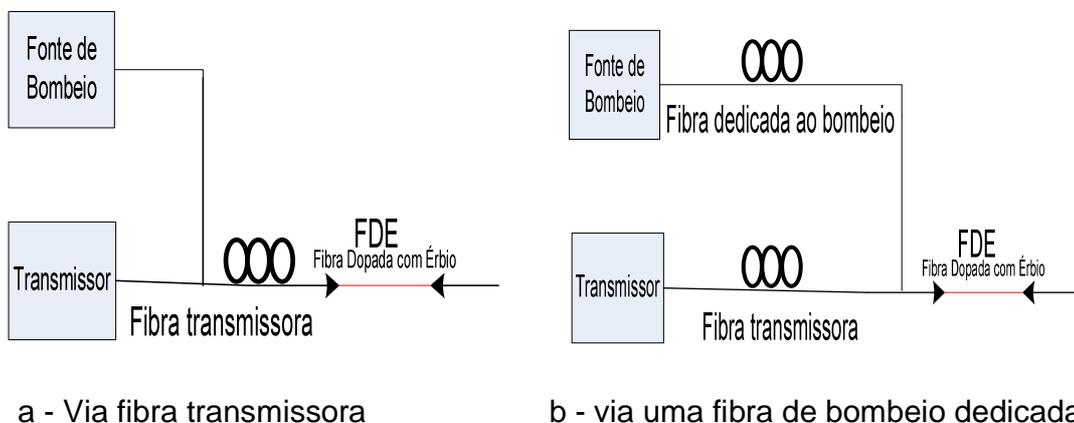


Figura 4.2 – Configurações de “post-amplifier” remoto com bombeio: (a) via fibra transmissora e (b) via uma fibra de bombeio dedicada.

A localização ótima da fibra dopada (*Erbium Doped Fiber* - EDF) deve ser determinada pelo balanço entre as propriedades da fibra dopada e as não linearidades da fibra transmissora. Se a EDF for colocada muito perto do transmissor, as não linearidades limitarão o ganho e a potência do bombeio; se muito longe, a conversão de potência na EDF torna-se muito baixa [35].

4.4.2 – Amplificadores Ópticos com Bombeio Remoto na Recepção

Os pré-amplificadores bombeados remotamente [34] são muito atraentes para transmissão sem repetidores, pois eles permitem a transmissão por enlaces mais longos. A melhoria, em termos de orçamento de potência é significativa, mesmo para fontes de bombeio semicondutoras, com potência na faixa de 300 mW. Com fontes mais potentes, provenientes de lasers Raman, pode-se conseguir melhorias da ordem de 20 dB.

O pré-amplificador remoto torna-se entrada de um receptor estendido, que inclui parte da fibra transmissora. Três configurações, como ilustrado na Figura 4.3, são geralmente consideradas para bombeio remoto de EDFs. Na topologia mais simples; Figura 4.3a, o bombeio é provido pela fibra transmissora, com benefícios comerciais óbvios, já que não se necessita de fibras extras no cabo óptico.

Numa configuração alternativa, Figura 4.3b, uma fibra dedicada transporta o bombeio, ou parte dele. Esta opção, embora com implementação mais cara, é atrativa quando se emprega mais de um bombeio; pois oferece fácil acesso a duas portas de bombeio, sem necessitar de um esquema de multiplexação, quer de polarização, quer de comprimento de onda. Além disso, esta topologia permite o uso de bombeios com potências mais altas (as ondas Stokes geradas por tais bombeios não interferirão com o sinal), o que implica num grande aumento do orçamento de potência do sistema.

O bombeio remoto bi-direcional é possível na configuração da Figura 4.3c, embora ela não ofereça uma melhoria significativa uma vez que não emprega o refletor de bombeio (grade de bragg em fibra) para o aumento de eficiência do bombeio.

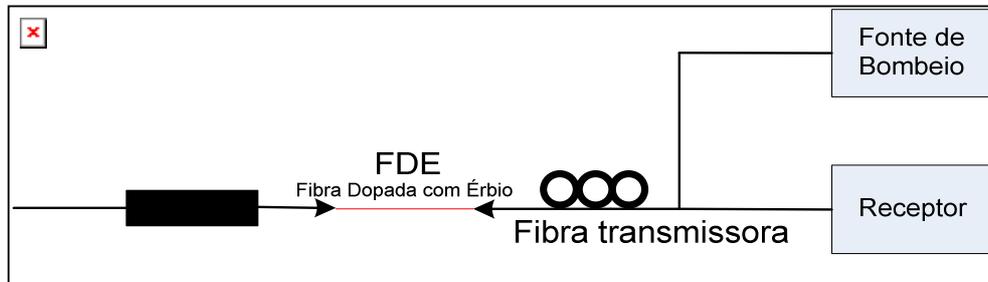


Figura 4.5a - Bombeio pela fibra transmissora

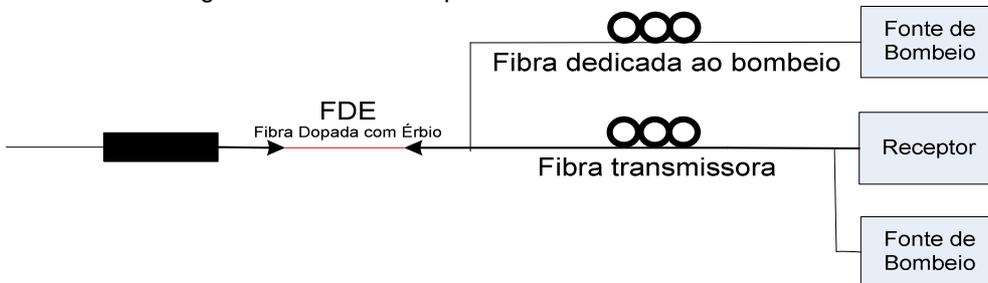


Figura 4.3b – Uma fibra dedicada transporta o bombeio, ou parte dele.

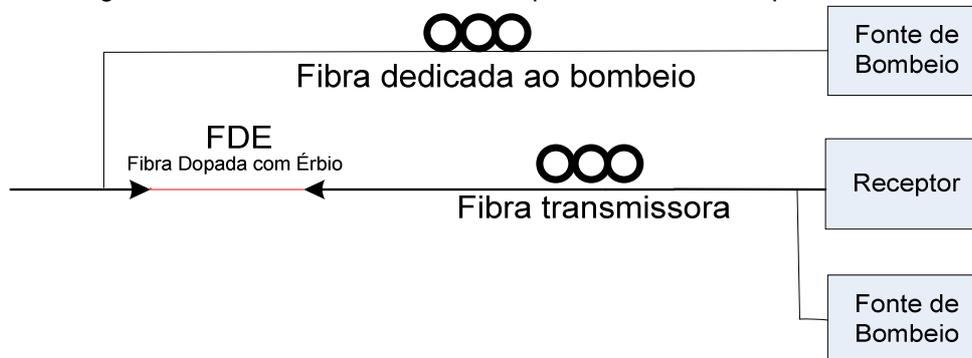


Figura 4.3c – Bombeio remoto bidirecional.

Figura 4.3 - Topologias típicas do receptor com pré – amplificador bombeado remotamente: (a) Bombeio pela fibra transmissora, (b) Uma fibra dedicada transporta o bombeio ou parte dele, (c) Bombeio remoto bidirecional.

A máxima potência de bombeio que pode ser lançada numa fibra dedicada ao bombeio é determinada pelo limiar Raman [36]. Quando a potência aproxima-se deste limiar, uma fração significativa do bombeio é transferida para ondas

Stokes de ordem superior e, portanto, é perdida. A emissão Raman espontânea, dentro da banda de amplificação da EDF, também pode degradar o desempenho do amplificador se não for eliminada antes da injeção do bombeio na EDF.

4.5 – Dimensionamento do Sistema Óptico Sem Repetição para o Tramo Oeste

O desafio neste trabalho; foi a utilização de fibras monomodo convencionais SMF do cabo OPGW instalado no sistema, que tem perdas mais altas, da ordem de 0,22 dB/Km; ao contrário das fibras de sílica pura, que tem atenuação muito mais baixa (0,17 a 0,18 dB/Km) e alto limiar de ocorrência de efeitos não lineares.

O dimensionamento exato dos sistemas ópticos sem repetição [36] [37], depende de uma estimativa precisa das distâncias dos amplificadores remotos aos respectivos terminais; que é feita por meio de simulações. As distâncias e os comprimentos dos segmentos até aos pós e pré-amplificadores remotos; ou, entre os mesmos, foram otimizados através da utilização de fibras apagadas do cabo OPGW instalado no sistema, justamente para aumentar a potência de bombeamento dos amplificadores remotos.

As tecnologias utilizadas no desenvolvimento do projeto foram: o software de simulação optisystem 4.1™ da empresa Optiwave System Inc; as fibras ópticas monomodo padrão SMF, transmissores ópticos, amplificadores e pré-amplificadores ópticos, pós - amplificadores e pré - amplificadores bombeados remotamente; e amplificação Raman distribuída com bombeio reverso. A topologia usada para a implementação do projeto se reporta na utilização dos amplificadores ópticos à fibra dopada com érbio, bombeados remotamente. Os parâmetros ou requisitos técnicos utilizados nos projetos para oito canais WDM são os indicados abaixo:

- Taxa de transmissão = 2,5 Gbit/s.
- Extensão do sistema óptico do tramo oeste = 731 Km.
- Atenuação da fibra monomodo convencional padrão (SMF) em 1550 nm = 0,22 dB/km, [38].

- Margem de operação do sistema = 3 dB para simulação de oito canais WDM de 2,5 Gbit/s.

O produto do valor da distância pela atenuação da fibra, somado à margem de operação resulta em certa atenuação total; atenuação total esta, que é o valor mínimo que o sistema sem repetição deverá prover em termos de faixa dinâmica. Uma margem adicional eventualmente é necessária para cobrir possíveis penalidades na recepção devido à degradação da sensibilidade associada à presença de ruído dos amplificadores remotos; efeitos não lineares e dispersão cromática. A potência de transmissão tem que estar limitada ao valor de limiar de geração do efeito Brillouin (valor em torno de + 20 dBm), que é um efeito não linear que degrada a qualidade de transmissão do sinal.

Para a simulação do projeto, foram utilizados em Tucuruí, amplificador *booster* de potência de saída de 16 dBm, para oito canais WDM; valor de potência esse, bem abaixo do valor limiar de Brillouin. Para a utilização de amplificação remota, as fibras escolhidas para enviar a potência de bombeio podem ser, no caso de recepção, a mesma fibra do sinal ou outras fibras inativas ou apagadas do cabo OPGW. Já com relação ao lado da transmissão, não poderá ser utilizada a fibra de sinal para envio da potência de bombeio, devido à degradação da relação sinal-ruído, proporcionado pela transferência do ruído de intensidade relativa do laser de bombeio, para o sinal.

Para o sistema sem repetição, a configuração ou topologia escolhida para o amplificador; para a simulação do projeto para oito canais WDM, é a configuração com bombeio co-propagante de simples passagem, mostrada na Figuras 4.4, onde tal configuração; típica do EDFA com bombeio co-propagante, é composto por uma fibra monomodo dopada com érbio, da ordem de dezenas de metros de comprimento.

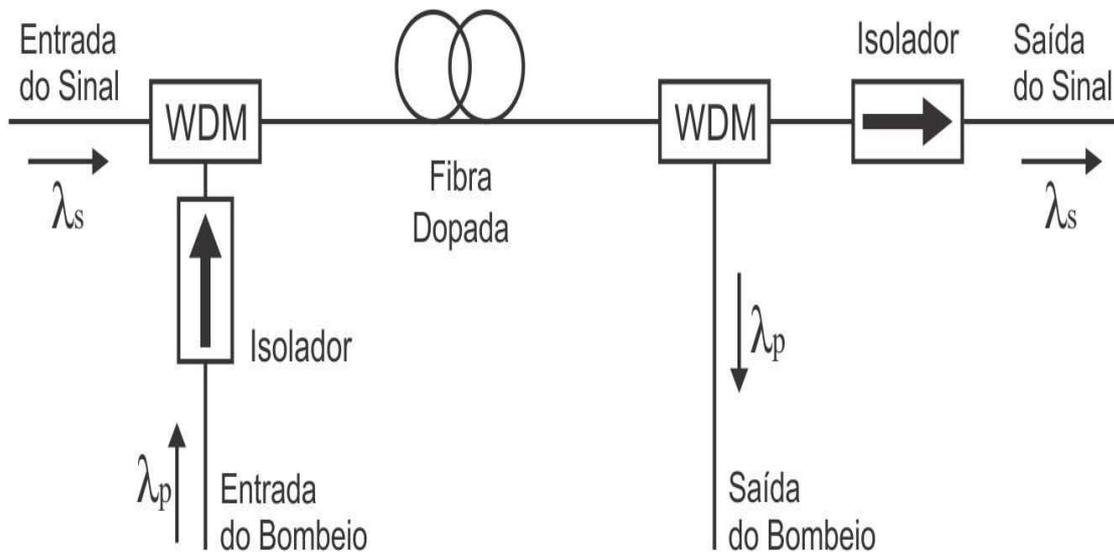


Figura 4.4 - Configuração com bombeio co – propagante de simples passagem, ou convencional.

Conforme a figura 4.4, observa-se que, o sinal óptico, ao entrar no amplificador, é sobreposto ao sinal proveniente de um laser de bombeio em um acoplador direcional WDM. A função do laser de bombeio é a de fornecer energia para que o processo de amplificação ocorra, de forma análoga ao que acontece com as fontes de tensão DC nos amplificadores eletrônicos. Assim, ao se propagar pela fibra dopada, cada canal óptico do sinal de entrada é amplificado por meio de emissões estimuladas; frutos da inversão da população de portadores na fibra dopada, provocada pelo laser de bombeio. A seguir, o sinal amplificado passa por um segundo acoplador WDM, cuja função é a de filtrar o sinal de bombeio. Na saída do EDFA, um isolador é utilizado para impedir que reflexões ou sinais indesejados presentes na saída sejam acoplados ao amplificador. Observa-se, portanto, que o funcionamento do EDFA depende da utilização de um dispositivo de bombeamento de potência óptica. De uma maneira geral, pode-se dizer que a função do dopante na fibra é a de converter a energia óptica de bombeio em energia disponível para a amplificação do sinal óptico que está sendo transmitido.

Em vista do que foi exposto, observa-se que além da importância da utilização dos EDFAS nos sistemas de comunicação óptica, deve-se tentar otimizar seus parâmetros de funcionamento. Uma das alternativas viáveis para tal é o estudo de diferentes configurações para estes amplificadores. Desta forma, os parâmetros tais como o ganho, figura de ruído, e a ASE, podem ser convenientemente melhorados; para um desempenho global superior do EDFA. Na verdade, essas três características básicas dos amplificadores, influenciam no desempenho de um sistema óptico.

O ganho de um EDFA é uma consequência direta de características como topologia, dopagem, comprimento da fibra dopada, raio do núcleo, potência de entrada do sinal, potência de bombeio e comprimento de onda do bombeio, entre outros. Dependendo do nível de potência óptica na entrada do amplificador; pode-se alcançar valores típicos de ganho (pico) na faixa de 30 a 40 dB. Ganhos ligeiramente maiores são obtidos com diferentes configurações de amplificadores. Similarmente ao que acontece com amplificadores eletrônicos, o EDFA também está sujeito à saturação de ganho. Normalmente, a saturação ocorre quando a potência óptica de entrada do amplificador se situa em torno de algumas centenas de miliwatts. Porém, o valor exato para a potência de saturação irá depender das características de operação do EDFA. Deve-se ressaltar que, para a potência de saturação, a contribuição da ASE não pode ser descartada. Em alguns sistemas, quando a potência do sinal de entrada é baixa, o próprio ruído ASE tende a saturar o amplificador.

A figura de ruído é um parâmetro importante que deve ser analisado em amplificadores ópticos e que influencia no desempenho de um sistema óptico. A figura de ruído indica a quantidade de ruído adicionada ao sinal pelo próprio amplificador, ou seja, leva em consideração, principalmente, a deterioração do sinal pela contribuição do ruído de emissão espontânea. Em muitos casos, o ruído ASE gerado em um EDFA pode ser o fator limitante do desempenho em um enlace de transmissão óptica. Por exemplo, em alguns sistemas, o próprio ruído ASE tende a saturar o amplificador e causar problemas na amplificação dos canais WDM, degradando a relação sinal-ruído (*signal to noise ratio* - SNR) de

saída do amplificador. Da mesma forma, a SNR de um amplificador poderia ser otimizada dependendo da configuração adotada para o EDFA.

Quanto à emissão espontânea amplificada (ASE); e como já é sabido, o amplificador óptico produz um “ruído óptico” devido ao processo de emissão espontânea amplificada (*Amplified Stimulated Emission - ASE*), cobrindo uma região de aproximadamente 35nm. Assim, sua faixa deve ser limitada através de um filtro óptico antes de chegar ao fotodetector para que a penalidade, oriunda da presença da ASE no processo de detecção/decisão, seja minimizada. A resposta espectral do fotodetector “enxerga” toda a faixa de ASE. Esta filtragem torna-se muito importante quando o amplificador óptico opera como pré-amplificador [39].

Outra importante consideração a ser feita, é relativa ao posicionamento dos amplificadores remotos. Devido às características sistêmicas distintas entre o lado de transmissão e o lado de recepção, a posição ótima dos amplificadores remotos não é simétrica; e sim, relativa às estações terminais. No lado da transmissão, a posição ótima é fortemente limitada pela geração de efeitos não lineares; entre eles, o efeito Brillouin e a automodulação de fase [36]. Esses efeitos têm maior probabilidade de ocorrência, quanto mais próximo da estação terminal estiver o amplificador remoto; dado que a potência de bombeio é maior e, portanto, será maior o ganho ou a potência de saída do amplificador. Por outro lado quanto mais distante da estação terminal, menor será a potência de bombeio que chegará ao mesmo, e, portanto, menor a potência de saída. Logo, existe um ponto ótimo para instalação do amplificador remoto de transmissão. Para o amplificador remoto de recepção; quanto mais distante da estação terminal, maior será a distância do enlace total conseguido; porém, quanto mais distante da estação, menor será a potência de bombeio que chega ao amplificador remoto; e, portanto, menor será o ganho. Existe também um ponto ótimo para instalação do amplificador remoto de recepção.

Um ponto importante também se relaciona com os valores de potência de entrada no amplificador remoto de recepção. Valores abaixo de - 42 dBm comprometem significativamente o desempenho da taxa de erros do sistema, devido a baixa relação sinal ruído apresentada.

Para obtenção dos pontos ótimos de instalação, vários parâmetros sistêmicos devem ser avaliados simultaneamente entre eles: as atenuações de bombeio e sinal; os ganhos e as figuras de ruído dos amplificadores remotos que variam com a potência de sinal e de bombeio; a sensibilidade de recepção, a potência do transmissor, entre outros. Por outro lado os efeitos da dispersão cromática devem ser também avaliados.

4.6 – Especificação dos Amplificadores Ópticos

Neste contexto foram especificados os parâmetros para a escolha dos amplificadores. Entre estes parâmetros tem-se a potência de bombeio, o comprimento da fibra dopada, além do ganho e da figura de ruído. A escolha da configuração do circuito do amplificador; tem forte influência no desempenho sistêmico. Para o amplificador de bombeio remoto de transmissão e recepção, a configuração conhecida como bombeio co-propagante de simples passagem foi adotada, conforme já foi mostrado na figura 4.4 anterior. Tal configuração é a tradicionalmente usada em circuitos de amplificação óptica.

4.7 – Simulações pelo Software de Simulação Optisystem 4.1™

A simulação verifica os resultados quanto à posição ótima dos pós e pré - amplificadores de bombeio remoto do sistema, assim como também verifica o desempenho do sistema quanto à taxa de erro de bit (BER) e garantir a não ocorrência ou minimização de efeitos não lineares.

Foi realizada a simulação sistêmica da posição ótima dos amplificadores de bombeios remotos passivos à fibra dopada com érbio de transmissão e recepção; assim como também, dos amplificadores locais de Altamira e Transamazônica, e amplificador Raman distribuído. Para isso foi utilizado o software de simulação optisystem 4.1™. Nas simulações realizadas foram usados os dados de atenuação da fibra monomodo padrão SMF-28 de 0,22 dB/Km em 1550 nm; coeficiente de dispersão $D = 18 \text{ ps}/(\text{Km.nm})$; já mencionados anteriormente. As

localizações dos amplificadores bombeados remotamente; foram otimizadas para obtenção da menor taxa de erros possível.

Foram alocados oito canais WDM, nas frequências de 192.1; 192.3; 192.5; 192.7; 192.9; 193.1; 193.3; 193.5 THz; sendo que estas frequências estão de acordo com as recomendações padrões ITU-T G.692 que padronizam as frequências ou comprimentos de onda que podem ser utilizados em sistemas WDM, que especificam 200 GHz entre canais, sendo que as simulações levaram em consideração que a menor frequência lançada na fibra foi de 192.1 THz e a partir deste valor se seguiu o espaçamento. Para a simulação de oito canais WDM, a taxa de erro para o pior caso foi de 10^{-11} para o canal 3. A simulação realizada mostra um bom desempenho sistêmico para o sistema sem repetição a ser implantado no Tramo Oeste.

Para simular a transmissão dos oito canais WDM, foi utilizado o componente da biblioteca *optical transmitters of component library*, denominado transmissor WDM (*WDM transmitter*), que é um subsistema que reúne dentro de si vários transmissores ópticos alocados cada um, numa frequência óptica. Esse componente permite configurar os parâmetros tais como: o número de canais, as frequências ópticas, o espaçamento em frequência entre canais, a potência transmitida por canal, e o tipo de codificação do sinal elétrico. Foi utilizado também, o componente WDM Mux 8x1, cuja função é multiplexar os canais ópticos relativos aos oito canais; a fim de transmiti-los para o sistema. Esse componente permite também selecionar as frequências que serão multiplexadas; e os canais ópticos multiplexados, são injetados no amplificador *booster*.

O sinal óptico que é lançado pelo *booster*, na extremidade da fibra; do lado da transmissão, tem como destino, o terminal receptor; que fica na outra extremidade. Para demultiplexar os canais; utiliza-se o componente WDM Demux 1x8. Cada canal demultiplexado é então acoplado a um fotodiodo PIN, que tem a função de converter o sinal óptico para o domínio elétrico. A saída de cada fotodiodo está ligada a um filtro passa-baixas, que visa filtrar as componentes de alta frequência, recuperando assim, o sinal digital original.

Foram levados em conta nas simulações, os ruídos inerentes ao fotodiodo PIN, tais como o ruído térmico, balístico e os ruídos resultantes do batimento do sinal com o ruído ASE e do ruído ASE com ele mesmo. Dessa forma, o nível real dos efeitos dos ruídos no desempenho do sistema é altamente satisfatório.

4.8 – Projeto do Tramo Oeste com Bombeamento Remoto e Expansão da Capacidade para WDM oito Canais, à Taxa de 2,5 Gb/s

O sistema óptico do Tramo Oeste sem regeneração eletrônica é limitado por atenuação, devido a grande extensão do sistema. Essa limitação pode ser vencida, ao se utilizar amplificadores ópticos de alto ganho; e/ou transmitir potência óptica de nível alto. Neste trabalho, apresenta - se amplificação em todo o sistema do Tramo Oeste, totalmente óptica, sem uso de regeneradores eletrônicos.

Além de serem usados amplificadores ópticos de ganhos consideráveis; verificou-se a necessidade de se transmitir de forma adequada, certo nível de potência, que pudesse vencer a atenuação óptica, para que os mesmos não alcançassem um ganho excessivo; e, dessa maneira, manter o ruído ASE em um nível aceitável, para evitar então, o aumento dos efeitos não lineares na fibra; e manter uma relação de compromisso entre minimizar os efeitos não lineares que se agravam com o aumento da potência óptica transmitida, e a atenuação do enlace óptico.

Assim, simulou-se um sistema WDM de oito canais de 2,5 Gbit/s cada, sem utilizar regeneração eletro-opto-eletrônica (OEO). Foram realizadas simulações para o enlace do Tramo Oeste, com 731 Km de extensão. Outro objetivo deste trabalho consiste também na eliminação da repetidora de Pacajá; ou seja, esta proposta consiste na substituição da estação repetidora, onde amplificadores ópticos alimentados eletronicamente nessa estação, são substituídos por amplificadores passivos instalados em caixas de emendas ópticas ao longo da linha de transmissão (cabo OPGW) e alimentados opticamente pela própria fibra, através de fontes remotas.

Para atingir este objetivo, simulou-se a implantação de amplificadores remotos entre Tucuruí e Altamira e em outros trechos, como entre Altamira e Uruará (Tranzamazônica).

4.8.1 - Enlace do Tramo Oeste com Bombeamento Remoto e WDM oito Canais a 2,5 Gb/s

Para as simulações realizadas, foi utilizado em Tucuruí, um amplificador booster de potência de saída de 16 dBm; e para a simulação no trecho entre a subestação Tucuruí e a de Altamira foram acrescentados um pós – amplificador remoto, bombeado da subestação Tucuruí, e dois pré – amplificadores remotos, bombeados de Altamira.

Os valores de potência de entrada do primeiro pré-amplificador remoto de recepção de Altamira; tem dependência com a potência de saída do pós - amplificador remoto de transmissão de Tucuruí e com a atenuação da fibra do segmento de enlace entre o pós – amplificador remoto de transmissão de Tucuruí e o primeiro pré - amplificador remoto de recepção de Altamira; assim como também, os valores de potência de entrada do segundo pré - amplificador remoto de recepção de Altamira; têm dependência com a potência de saída do primeiro pré - amplificador remoto de recepção de Altamira e com a atenuação da fibra do segmento de enlace entre o primeiro pré – amplificador remoto de recepção de Altamira e o segundo pré - amplificador remoto de recepção de Altamira.

Na subestação de Altamira foi colocado um amplificador local; e no trecho entre a subestação de Altamira e a subestação Transamazônica foi acrescentado um pré-amplificador remoto, bombeado da subestação Transamazônica. Na subestação Transamazônica foi colocado um amplificador local; e no trecho final do enlace entre a subestação Transamazônica e a subestação Rurópolis utilizou-se amplificação Raman, por meio de bombeio reverso na própria fibra de transmissão; ou seja, com bombeamento do lado da recepção em Rurópolis, com laser de 1W.

Como já mencionado, foram realizadas simulações no enlace do Tramo Oeste, com 731 Km de extensão, para sistema WDM oito canais à taxa de 2,5 Gb/s cada, sem utilizar regeneração eletro-opto-eletrônica (OEO). A potência de saída do *booster*, lançada na fibra em Tucuruí, para simulação dos oito canais foi de 7 dBm por canal, totalizando uma potência de 16 dBm na saída do *booster*. O amplificador pós-remoto foi bombeado por um arranjo de dois *lasers* com comprimentos de onda de 1470 nm e 1480 nm, com potência de 1 W cada. A localização desse pós amplificador remoto foi determinada de acordo com a distância que resultasse na potência de saída igual à do *booster*, ou seja, 7 dBm por canal, para oito canais WDM. O amplificador pós - remoto de Tucuruí, ficou a 70 Km da estação Tucuruí; e ganho de 15 dB.

Simulou-se a inclusão de um pré-amplificador remoto relativo à Altamira. Percebeu-se que apenas um amplificador remoto, não seria suficiente nesse sistema de oito canais. A degradação da OSNR seria muito grande; o que era de se esperar, pois o trecho Tucuruí – Altamira tem uma extensão de 365 km. Portanto, houve a necessidade da implantação de dois pré-amplificadores remotos, um a 100 km de distância de Altamira e o outro a 50 km da mesma cidade. O primeiro pré - amplificador foi bombeado com um arranjo de dois lasers de bombeio com comprimentos de onda de 1470 nm e 1480 nm, com 1 W cada um. O bombeio se deu a 100 km de distância de Altamira. O ganho desse amplificador está em torno de 14 dB. O segundo pré-amplificador remoto foi bombeado por apenas um laser de 1480 nm, e potência de 1 W; à distancia de 50 Km de Altamira.

As localizações desses pré – amplificadores; foram determinadas por utilizar-se na simulação, a varredura de várias distâncias. A figura de mérito utilizada como parâmetro de escolha das localizações, foi a OSNR. Escolheram-se os pontos ótimos de localização desses pré - amplificadores remotos, de forma tal, que resultassem nas mais altas OSNRs. Assim, a OSNR foi a figura de mérito utilizada como parâmetro de escolha das localizações dos pós e pré – amplificadores remotos. O ganho do primeiro pré - amplificador remoto de Altamira ficou em torno de 14 dB e o do segundo, foi de 36 dB. O amplificador de linha em

Altamira apresentou um ganho de 14 dB, e uma potência de saída por canal, de 7,5 dBm.

No trecho entre as estações de Altamira e Uruará (Transamazônica), o bombeamento do pré-amplificador remoto de Uruará se deu com um laser de 1480 nm, com potência de 1 W, à distância de 80 km de Uruará. O ganho do pré-amplificador remoto de Uruará está em torno de 14 dB.

O último trecho, entre a subestação Transamazônica e a subestação Rurópolis; que apresenta uma extensão de 161 km, contém um booster na estação de Uruará com ganho de 35,7 dB, com potência de saída de cerca de 8 dBm por canal. Foi utilizada amplificação Raman para superar a atenuação na própria fibra de transmissão, a partir da recepção em Rurópolis; com bombeamento do lado da recepção, com laser de 1 W, em 1450 nm. A Figura 4.5 mostra o diagrama do sistema óptico de transmissão sem repetição, para o Tramo Oeste; para oito canais WDM a 2,5 Gbit/s.

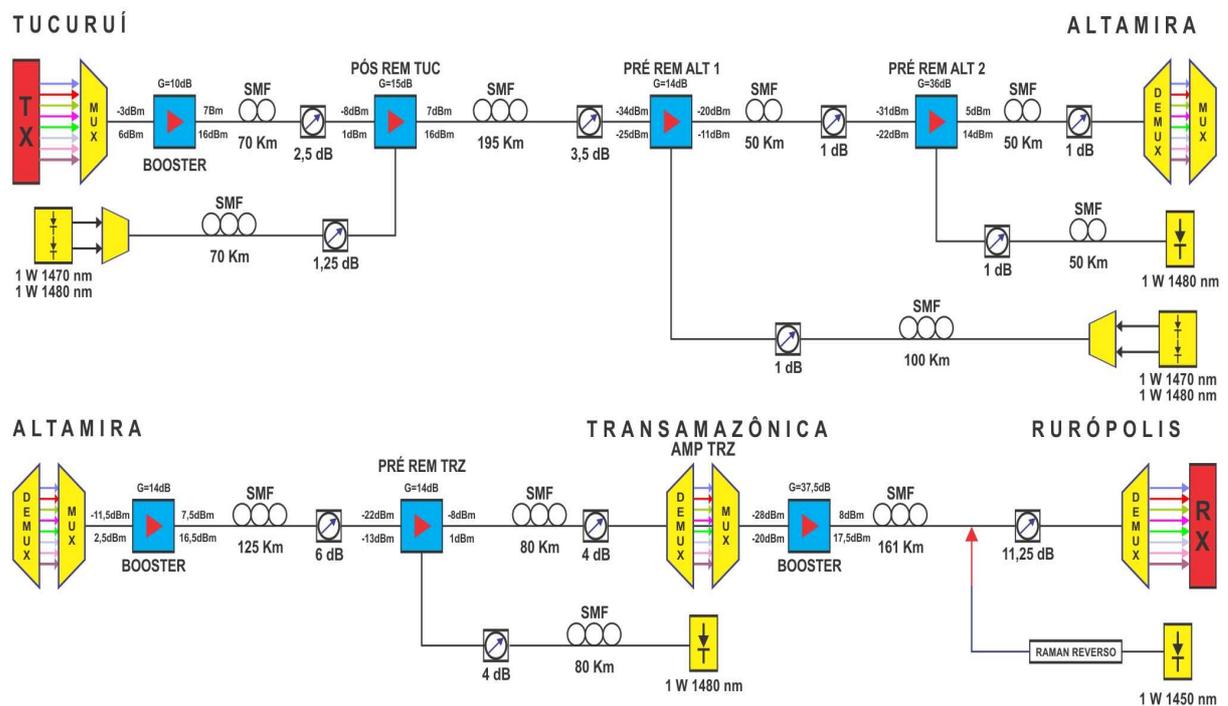


Figura 4.5 – Diagrama do sistema óptico de transmissão sem repetição para o Tramo Oeste, para oito canais WDM a 2,5 Gbit/s.

Para todos os trechos (spans) do sistema Tramo Oeste, utilizou-se uma margem de segurança de 3 dB, para levar em conta as mudanças nas características do sistema ao longo do tempo, devido o próprio fator de envelhecimento do mesmo; emendas, conectores, etc.

A Tabela 4.1 mostra os valores de atenuação e distância de cada trecho com valores referentes à nova configuração (sem a repetidora de Pacajá).

Trecho	Atenuação total do link (dB)	Distância (Km)
Tucurui - Altamira	79,50	365
Altamira - Transamazônica	55,00	205
Transamazônica - Rurópolis	51,50	161

Tabela 4.1 - Atenuação e distância de cada trecho com valores referentes à nova configuração (sem a repetidora de Pacajá).

4.8.2 – Resultados das Simulações para o Tramo Oeste com Bombeamento Remoto e WDM oito Canais a 2,5 Gb/s

A Tabela 4.2 apresenta os valores da OSNR, Q e BER, de cada canal na saída do demultiplexador.

CANAL	FREQUÊNCIA (THz)	OSNR (dB)	Q	BER
1	192,1	16,5	8,54	$4,96 \times 10^{-18}$
2	192,3	18,1	7,97	$5,89 \times 10^{-16}$
3	192,5	16,5	6,41	$4,83 \times 10^{-11}$
4	192,7	16,4	7,77	$2,78 \times 10^{-15}$
5	192,9	16,3	7,77	$2,78 \times 10^{-15}$
6	193,1	17,5	7,96	$6,23 \times 10^{-16}$
7	193,3	15,4	7,80	$2,21 \times 10^{-15}$
8	193,5	15,0	7,13	$3,67 \times 10^{-13}$

Tabela 4.2 – Valores das simulações para o Tramo Oeste com bombeamento remoto e WDM oito canais a 2,5 Gb/s; de OSNR, Q e BER, para cada canal na recepção, na saída do demultiplexador.

Os valores da BER e os diagramas de olho; podem ser visualizados nas Figuras 4.6a até 4.6h.

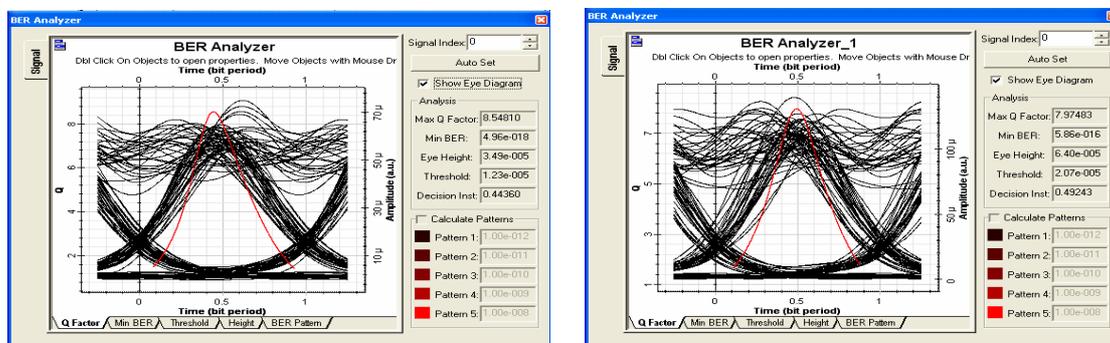


Fig. 4.6a - Diagrama de olho e BER do canal 1. Fig. 4.6b - Diagrama de olho e BER do canal 2.

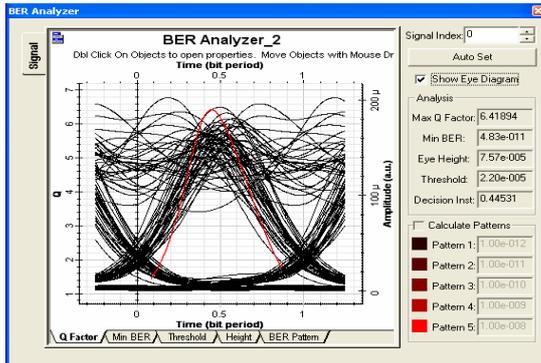


Fig. 4.6c - Diagrama de olho e BER do canal 3.

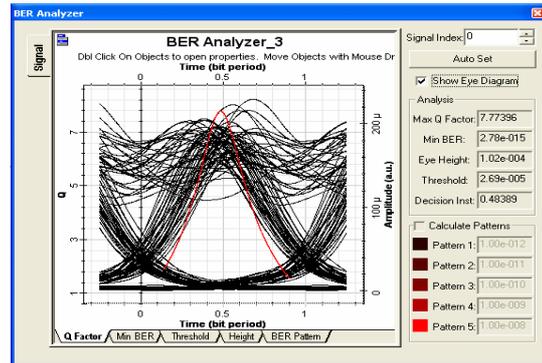


Fig. 4.6d - Diagrama de olho e BER do canal 4.

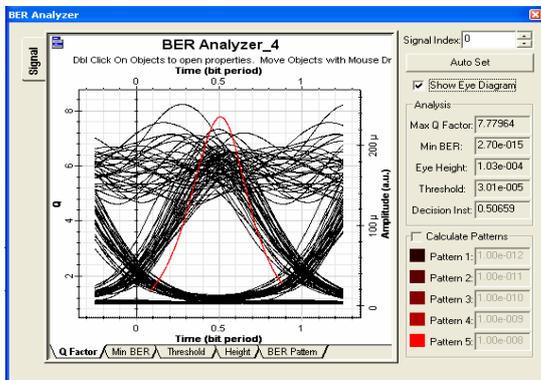


Fig. 4.6e - Diagrama de olho e BER do canal 5.

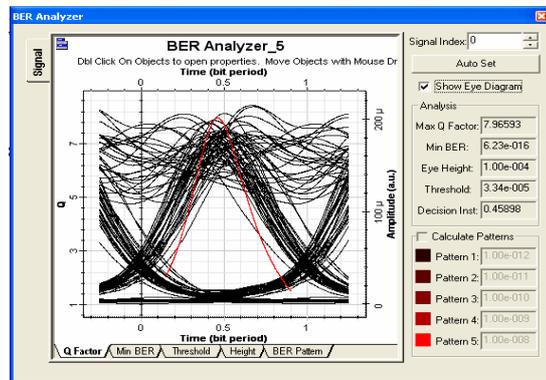


Fig. 4.6f - Diagrama de olho e BER do canal 6.

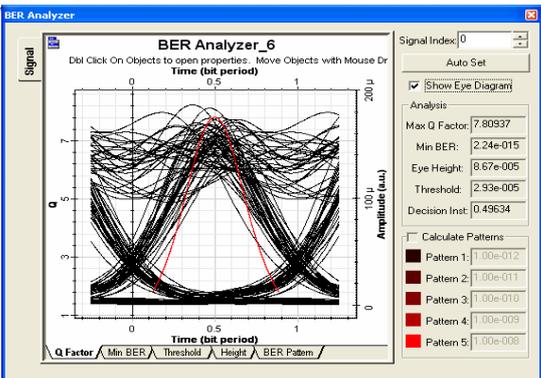


Fig. 4.6g - Diagrama de olho e BER do canal 7

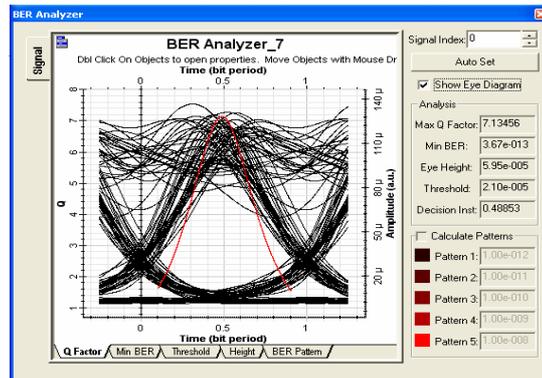


Fig. 4.6h - Diagrama de olho e BER do canal 8

Figuras 4.6 – Diagramas de olho e BER dos oito canais WDM a 2,5 Gbit/s, do sistema Tramo Oeste sem repetição.

4.9 - Desempenho do Sistema WDM oito canais a 2,5 Gbit/s para o Tramo Oeste.

A simulação do sistema óptico do Tramo Oeste utilizando bombeamento remoto, foi para que a localização do pós e do pré-amplificador bombeados remotamente, fossem otimizados para obtenção do melhor desempenho do sistema, em termos da menor taxa de erro de bit possível. Na tabela anterior 4.2, foram apresentados os valores da OSNR, Q e BER; relativos a cada canal, do sistema de oito canais a 2,5 Gb/s. Os resultados observados mostram um bom desempenho sistêmico, para o sistema sem repetição para o Tramo Oeste. Assim, os valores dos resultados de BER obtidos na simulação, mostraram que foi possível efetivar a transmissão dos oito canais WDM a 2,5 Gbps, com qualidade de nível considerável, ao longo dos 731 Km que totalizam a extensão do sistema Tramo Oeste. O nível de potência de transmissão para o sistema projetado, foi de 16 dBm; para oito canais a 2,5 Gb/s. Quanto ao desempenho em termos de taxa de erro de bit, o projeto para o respectivo sistema, apresentou um desempenho satisfatório.

Para analisar o desempenho dos amplificadores ópticos, foi utilizado o componente disponível no optisystem; o visualizer library, denominado dual port WDM analyzer. Este componente permite visualizar os parâmetros do amplificador para cada canal WDM; tais como o ganho, a figura de ruído, as potências de entrada e saída e a relação sinal-ruído óptica (OSNR). A uniformidade de ganho para a faixa de operação dos amplificadores ópticos; é a característica dos mesmos.

4.10 – Tecnologias Envolvidas no Sistema Óptico sem Repetição do Tramo Oeste

Os elementos principais que compõem o sistema sem repetição são os pós – amplificadores e pré - amplificadores de bombeios remotos, fonte de bombeio

remoto para 1480 nm, fonte de bombeio para 980 nm, amplificador Raman, transmissor óptico e receptor óptico.

4.10.1 – Fontes de Bombeio

Laser de bombeamento

Frequência = 980 / 1480 nm

Potência = 1 W

Para uma potência desse porte (ver apêndice A), a fonte de bombeio consiste no arranjo de quatro lasers, cada um com potência máxima de 360 mW. Dois lasers operando no comprimento de onda de 1470 nm são multiplexados por polarização ortogonal. O mesmo se dá com outros dois lasers de 1480 nm. Os quatro feixes ópticos são posteriormente multiplexados em comprimento de onda para obter uma saída única com uma potência máxima da ordem de mais de 1 W. A Figura 4.7 mostra o arranjo dos quatro lasers ópticos da fonte de bombeio.

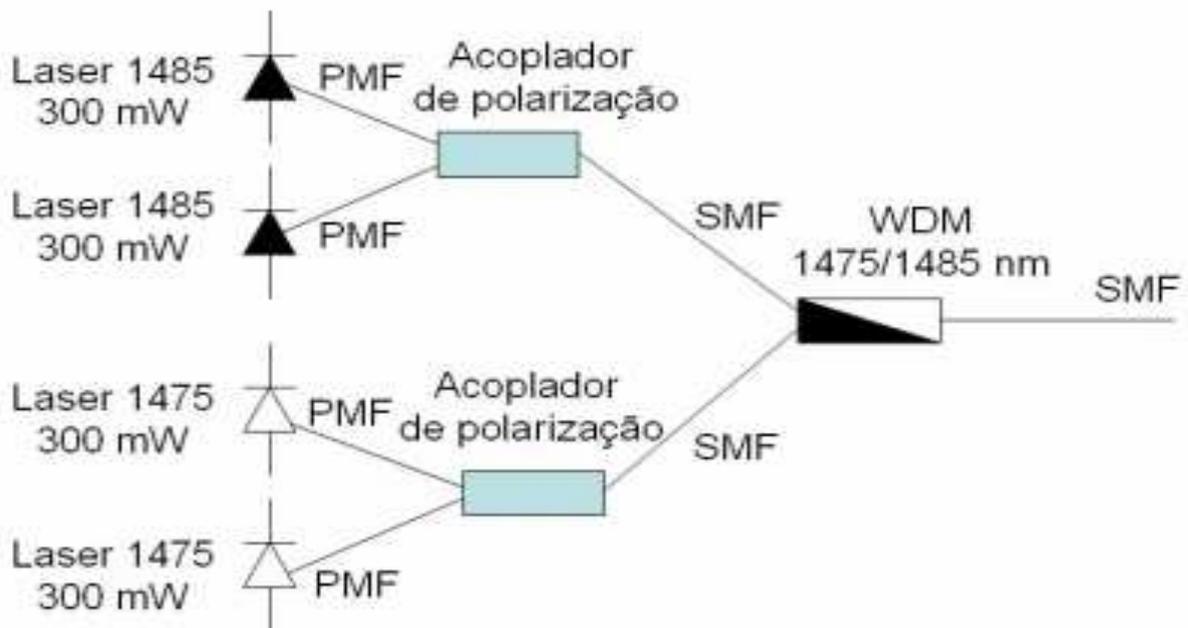


Figura 4.7 - Arranjo dos quatro lasers ópticos da fonte de bombeio de alta potência.

4.10.2 - Pós Amplificador e Pré – Amplificador Remotos

A configuração utilizada para os respectivos pós - amplificador remoto e para o pré – amplificador remoto de transmissão e recepção, é a configuração com bombeio co-propagante de simples passagem, que utiliza um multiplexador de bombeio; um determinado comprimento de fibra dopada com érbio, e um isolador de saída.

Para os pós e os pré - amplificadores de bombeios remotos serem instalados no sistema, os mesmos podem ser acondicionados em caixas de emendas ópticas dos cabos OPGW, instaladas nas torres de transmissão, ao longo do sistema, conforme mostra a Figura 4.8.



Figura 4.8 – Ilustração de acondicionamento dos pós e pré - amplificadores em caixa de emenda óptica, e instalados nas torres de transmissão.

4.10.3 - Transmissor WDM

4.10.3.1 - Características do Transmissor WDM

Potência = 0 dBm

Frequência = 192.1 Thz

Espaçamento de frequência = 200 Ghz

Tipo de modulação = NRZ.

Número de portas de saída = 8

4.10.3.2 - Receptor WDM

O receptor é composto de fotodetector PIN com responsividade $R = 1 \text{ A/W}$.

4.11 - Projeto Marabá - Santa Maria com Bombeamento Remoto e Amplificação Raman, com oito canais WDM de 10 Gbit/s

Para a abertura do mercado de telecomunicações no Brasil, há a necessidade do aumento na taxa de transmissão de dados na rede brasileira de comunicações. Para suprir essa demanda de serviços enfrentam-se problemas desde os de ordem econômica, até os de ordem tecnológica. Do ponto de vista econômico a primeira aproximação é procurar a atualização dos sistemas baseados nos enlaces atuais, de modo a evitar o alto custo com os serviços de substituição dos cabos de fibra óptica existentes.

Já na visão dos problemas de base tecnológica, existem restrições devido aos parâmetros de dispersão e atenuação que, no entanto, tem menor impacto na rede brasileira uma vez que a maior parcela dos enlaces de longa distância foi instalada já com o advento dos sistemas operando na janela de 1.55 μm .

Este capítulo se reporta às simulações que foram realizadas no enlace Marabá – Santa Maria, com 871 km de extensão; referente a um sistema WDM de oito canais de 10 Gbit/s cada, sem a utilização da regeneração eletro-opto-

eletrônica (OEO); e também, objetivando a eliminação da repetidora de Jacundá, (estação sem repetição) assim como também, os custos provindos da mesma; onde, para se conseguir este intento, simulou-se a implantação de amplificadores bombeados remotamente, entre Marabá e Tucuruí e em outros trechos do enlace.

4.11.1 - Enlace Marabá – Santa Maria com Bombeamento Remoto e Amplificação Raman, com oito Canais WDM de 10 Gbit/s

A Eletronorte lançou uma grande rede de fibra óptica no Estado do Pará, utilizando a tecnologia de cabos ópticos OPGW (*Optical Ground Wire*), que reúne as funções de cabo pára-raios e de linha transmissora de dados. Foi realizado um estudo por meio de simulação nessa rede, com o objetivo de verificar a possibilidade de uso de WDM sobre os enlaces existentes, considerando a presença de efeitos não lineares no enlace.

Para essa simulação foram considerados os parâmetros reais das fibras transmissoras e receptoras dos enlaces, bem como as respectivas perdas de conectorização e emendas. A modelagem e simulação foram realizadas com o software de simulação Optisystem 4.1™. Houve mudança na configuração do sistema, com a retirada da estação repetidora de Jacundá, substituindo-a por estação sem repetição (bombeio remoto) e uso de amplificação totalmente óptica.

Nesse sistema, usa-se a fibra monomodo convencional SMF-36, que apresenta alto coeficiente de dispersão na região de 1.55 µm. Assim, foi inicialmente verificada a capacidade de aumento na taxa de transmissão através desses enlaces, sendo observado que são limitados por dispersão. Foram introduzidos módulos de fibra compensadora de dispersão (DCF) ao final do trecho em fibra óptica do enlace, para compensação da dispersão; verificando-se que com essa adição o sistema poderia operar até taxas de 10 Gbit/s ou mais.

Em sistemas WDM ideais, os canais não interagem e podem ser adicionados quando requeridos, cada qual operando em taxa elevada. Na prática, porém, as interações entre canais estão presentes e o número de canais é limitado pelos efeitos não lineares.

A simulação foi realizada para oito canais, e a separação entre canais foi segundo as normas G.692 da ITU-T, que especifica 200 GHz entre canais; sendo que a simulação levou em consideração que a menor frequência lançada na fibra foi de 192,1 THz e a partir deste valor se seguiu o espaçamento. Foi considerado também, os efeitos de FWM e a influência do espaçamento entre canais na degradação da qualidade do sinal transmitido face à presença desse efeito não linear. Para o uso de taxa de transmissão a 10 Gbps, para o espaçamento entre canais de 200 GHz; tal espaçamento permite maior distinção entre as portadoras, fazendo com que a influência das portadoras laterais; fossem cada vez menos significativas (diminuição da diafonia).

Para a taxa de transmissão de 10 Gbps, verifica-se também que esse espaçamento entre canais diminui a influência das portadoras laterais, isto é, como as portadoras principais ficam mais distantes uma das outras, os produtos de FWM a elas associados têm uma influência menos significativa nas raias principais; conseqüentemente, diminuindo a diafonia entre canais.

Para a realização da simulação para os oito canais, a potência de saída do amplificador booster em Marabá, consistiu de cerca de 4 dBm por canal; o que totaliza uma potência de 13 dBm na saída do referido amplificador. O amplificador pós-remoto foi bombeado por um laser com potência de 2 W, e comprimento de onda de 1480 nm; sendo que esse amplificador pós remoto da estação de Marabá, ficou a uma localização de 75 km da mesma; envolvendo um ganho de 14 dB, onde a potência de saída deste amplificador, foi em torno de 0 dBm por canal.

A 90 Km distante da estação de Tucuruí, simulou-se a inclusão de um pré-amplificador remoto, relativo a esta estação. Este pré-amplificador remoto é bombeado por um laser de 2W, no comprimento de onda de 1480 nm; e a sua localização foi determinada por se utilizar na simulação, a varredura de várias distâncias; onde a figura de mérito utilizada como parâmetro de escolha das localizações, foi a OSNR. O ponto ótimo de localização desse pré-amplificador remoto foi escolhido de forma tal; que resultasse na mais alta OSNR; sendo que o ganho desse pré-amplificador remoto ficou em torno de 11 dB. No trecho de fibra

entre o pré-amplificador remoto e a estação de Tucuruí, utilizou-se também a amplificação Raman no sentido reverso na própria fibra de transmissão, com bombeio na fibra por um laser de 1450 nm de comprimento de onda e potência de 1,5 W.

Na estação Tucuruí, assim como em todas as demais, foi utilizado na saída do amplificador de linha, um conjunto demultiplexador (demux) / multiplexador (mux) para fornecer filtragem óptica a todos os canais, visando reduzir o ruído ASE e dessa forma melhorar a OSNR. O filtro óptico utilizado foi o de Bessel, com largura de banda de 40 GHz. Em cada estação foi feita uma correção na variação de potência óptica entre os canais, por se inserir no demux, atenuações apropriadas para cada canal de forma a equalizar as potências. A potência por canal na saída do multiplexador de Tucuruí é de cerca de 0 dBm. Após 40 km instalou-se um amplificador de potência pós-remoto, com potência por canal em torno de 2,5 dBm.

No trecho entre o amplificador de potência pós - remoto de Tucuruí e a estação de Tailândia utilizou-se amplificação Raman por meio de bombeio reverso na própria fibra, com laser de 1450 nm de comprimento de onda com potência de 1 W; a partir da estação de Tailândia. Na saída da estação de Tailândia, a potência de saída por canal é de cerca de 0 dBm. O amplificador de potência remoto de Tailândia localiza-se a 55 km da estação de Tailândia e tem potência de saída por canal de cerca de 3 dBm. Entre o amplificador pós-remoto de Tailândia e a estação de Vila do Conde, usou-se amplificação Raman. Na saída da estação de Vila do Conde, a potência de saída por canal é de cerca de 0 dBm.

Na estação Belém, no trecho entre Vila do Conde e Belém, a estação de Belém tem a potência de saída por canal de cerca de 0 dBm. Utilizou-se no último trecho, entre Belém e Santa Maria, amplificação Raman. O laser de bombeio empregado para a amplificação Raman tem potência de 1W e comprimento de onda de 1450 nm. Na Figura 4.9, é mostrado o layout do diagrama sistêmico do enlace Marabá – Santa Maria com bombeamento remoto e amplificação Raman; com oito canais WDM de 10 Gbit/s; e a Tabela 4.3 mostra os valores de atenuação e comprimento de cada link, com a nova configuração.

Trecho	Atenuação Total do Link (dB).	Distância (Km)
Santa Maria / Belém	34,52	120
Belém / Prodepa	9,08	20
Belém / Vila do Conde	27,32	90
Vila do Conde /Tailândia	56,59	212
Tailândia/Tucuruí	51,07	189
Tucuruí/Marabá	73,84	260

Tabela 4.3 - Valores de atenuação e comprimento de cada link, com a nova configuração.

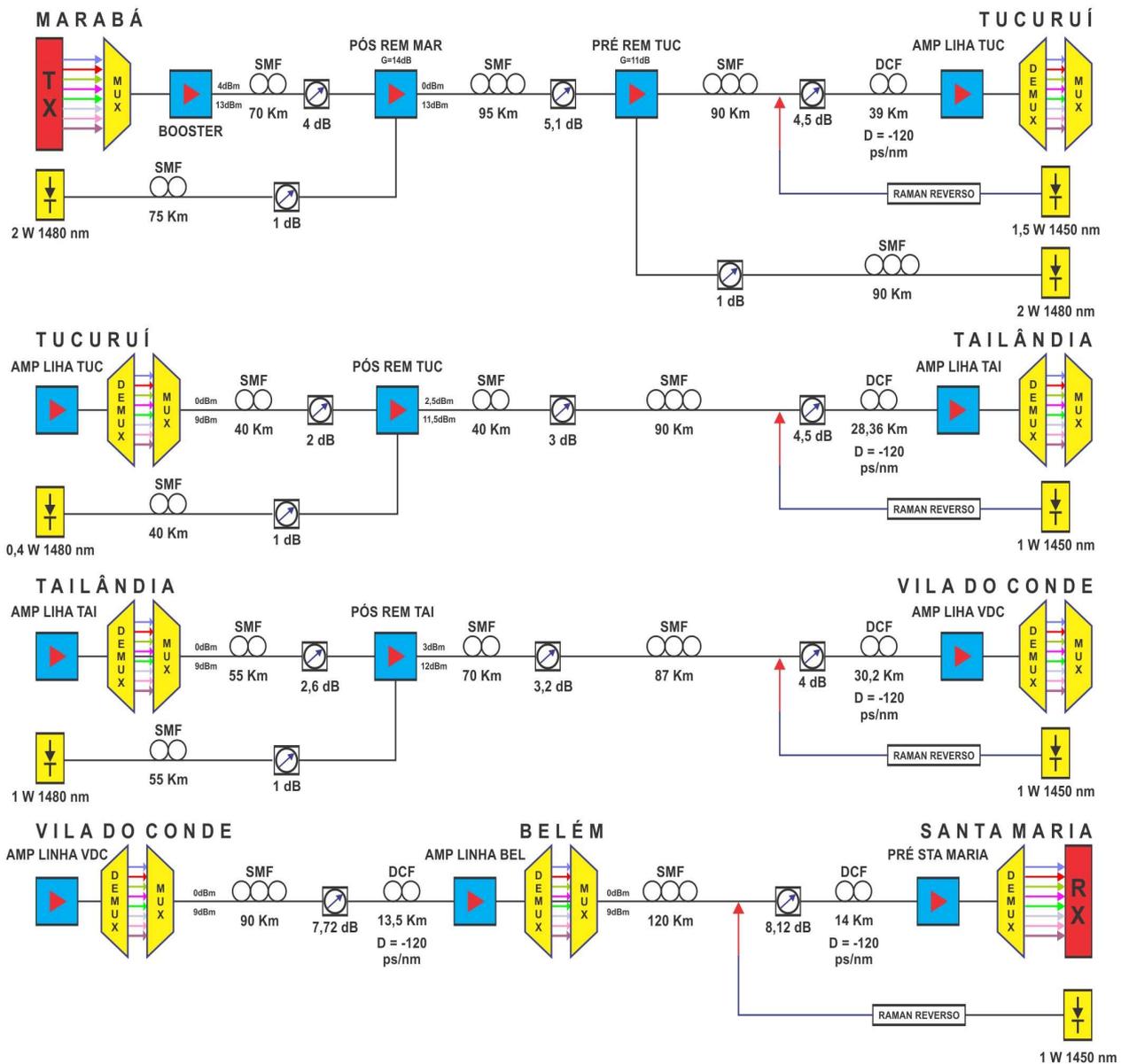


Figura 4.9 – Layout do diagrama sistêmico do enlace Marabá – Santa Maria com bombeamento remoto e amplificação Raman; com oito canais WDM de 10 Gbit/s.

4.11.2 – Resultados das Simulações do Trecho Marabá – Santa Maria com Bombeamento Remoto e Amplificação Raman, com oito Canais WDM de 10 Gbit/s.

A Tabela 4.4 apresenta os valores das OSNRS e BER, de cada canal na saída do demultiplexador, no final do enlace.

CANAL	FREQUÊNCIA (THz)	OSNR (dB)	BER
1	192,1	21,5	$1,12 \times 10^{-13}$
2	192,3	18,6	$5,24 \times 10^{-12}$
3	192,5	20,5	$1,49 \times 10^{-17}$
4	192,7	19,8	$2,44 \times 10^{-16}$
5	192,9	17,6	$8,39 \times 10^{-15}$
6	193,1	18,9	$1,48 \times 10^{-18}$
7	193,3	17,9	$9,72 \times 10^{-12}$
8	193,5	18,6	$6,20 \times 10^{-16}$

Tabela 4.4 - Valores de OSNR e BER, para cada canal na recepção, na saída do demultiplexador, para oito canais de 10 Gbit/s (Marabá – Santa Maria).

Os valores da BER e os diagramas de olho podem ser visualizados nas Figuras 4.10a até 4.10h.

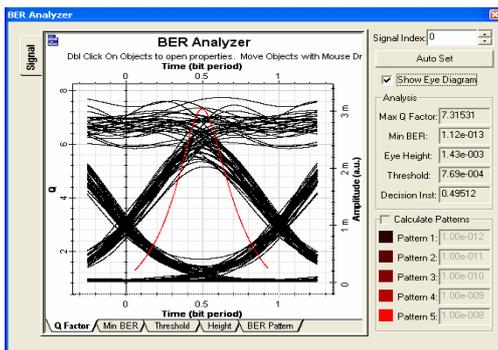


Figura 4.10a - Diagrama de olho e BER C1

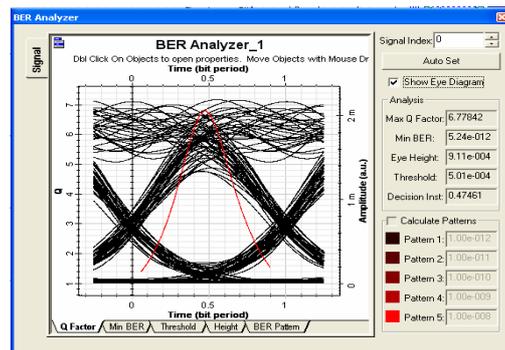


Figura 4.10b - Diagrama de olho e BER C2

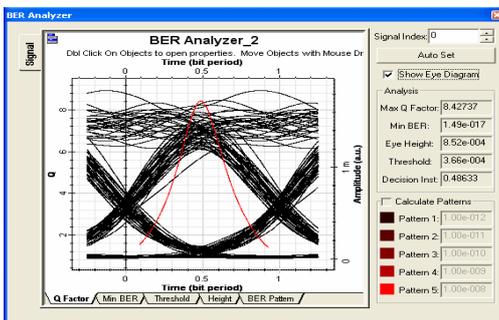


Figura 4.10c - Diagrama de olho e BER C3

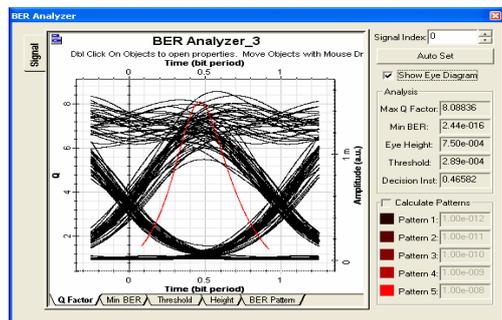


Figura 4.10d - Diagrama de olho e BER C4

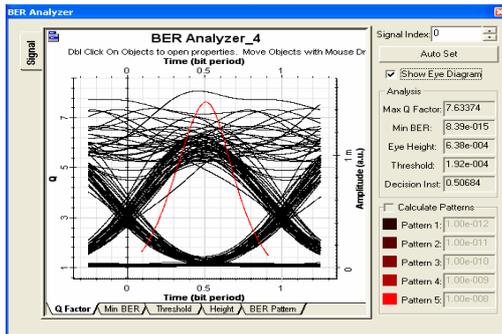


Figura 4.10e - Diagrama de olho e BER C5

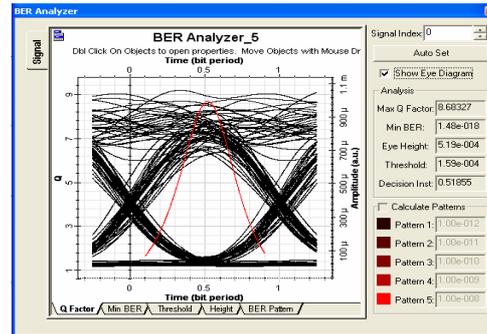


Figura 4.10f- Diagrama de olho e BER C6

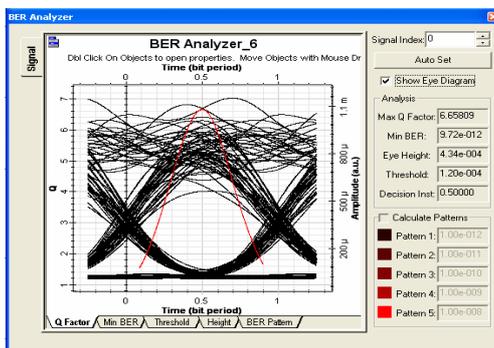


Figura 4.10g - Diagrama de olho e BER C7

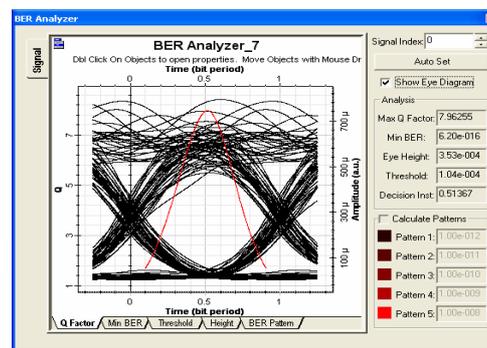


Figura 4.10h- Diagrama de olho e BER C8

Figuras 4.10 – Diagramas de olho e BER dos oito canais WDM a 10 Gbit/S, do enlace Marabá – Santa Maria, com bombeamento remoto e amplificação Raman.

Neste projeto, para atender à demanda pelo aumento de capacidade desse sistema de longo alcance, foram usados sistema WDM de oito canais de 10 Gbit/s, bombeamento remoto e amplificação Raman. Os amplificadores Raman apresentam simplicidade e flexibilidade; e são de baixo ruído. A amplificação Raman se destina somente a vencer a atenuação introduzida pelas perdas ao longo dos enlaces. Os amplificadores Raman se apresentam nos dias de hoje, como talvez, a melhor das soluções de amplificação, para enlaces ópticos de qualquer natureza, tenham estes, qualquer distância. A utilização das fibras ópticas que foram instaladas desde o início da implementação das redes ópticas, é um diferencial que pode ser amplamente aproveitado pelo uso de amplificações de Raman; que em conjunto com amplificadores ópticos existentes ou não, podem aumentar consideravelmente, as distâncias entre os enlaces.

As principais vantagens advindas do uso das amplificações de Raman, além da acima citada, ou seja, o uso em redes ópticas já existentes há 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 WDM, com menor espaçamento entre canais;
- Possibilitam a utilização de sistemas WDM, com altas taxas de transmissão;
- Reduzem sobremaneira, os efeitos não lineares, por possibilitar a operação com níveis menores de sinal.
- Melhoria da figura de ruído, com relação aos amplificadores discretos;
- Amplificação mais uniforme ao longo do enlace óptico.
- Permite o uso de sólitons.

Os amplificadores Raman apresentam as vantagens como o aumento de ganho, sem entrar na região dos efeitos não lineares; ao mesmo tempo em que a região de ruído é evitada. As vantagens são obtidas em enlaces ópticos convencionais, que possuem amplificadores ópticos convencionais, do tipo EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*), quando da introdução dos amplificadores Raman. Some-se ao exposto, que os Ramans estão com os preços cada vez menores e, com confiabilidade, cada vez maiores.

Neste trabalho; segundo as simulações realizadas; foram verificados o desempenho dos amplificadores Raman em enlaces compostos de fibras SMF com módulos de fibras DCF em esquema de compensação total da dispersão, onde a taxa de transmissão foi de 10 Gbps, em comprimento de onda de 1550 nm, e de um bombeamento no sentido reverso ou contra propagante na própria fibra de transmissão, no comprimento de 1450 nm. Na transmissão WDM de oito canais alocados na banda C e modulados em 10 Gbps por 871 km; que é a extensão do enlace Marabá – Santa Maria, de fibra monomodo convencional, as penalidades de potências medidas foram reduzidas através do uso de fibra compensadora de dispersão e amplificação Raman; elemento que permite compensar a dispersão cromática com baixas perdas.

A dispersão cromática está entre as principais fontes de penalidade em sistemas WDM de longa distância operando em altas taxas de modulação. Vários fatores combinados podem contribuir para agravar seus efeitos degradantes; por exemplo, a técnica de modulação, o tipo e comprimento da fibra transmissora e a banda espectral em que o sistema opera. Para sistemas com número de canais superior a quatro, o problema da dispersão é usualmente resolvido através do uso de fibras compensadoras de dispersão, DCFs. A degradação da relação “sinal-ruído” é também um efeito crítico em sistemas de longo alcance, porém seu impacto é reduzido através da amplificação Raman. A combinação das duas técnicas, DCF e Raman; foi utilizado para aprimoramento do sistema instalado visando sua adequação às necessidades atuais.

Na presença da dispersão cromática, a máxima distância de propagação L , para garantir uma penalidade menor ou igual a 1 dB é dada por [40]:

$$L_{1\text{dB}}^{-1} = \frac{1}{0,252} B^2 D(\lambda) \frac{(\lambda)^2}{c\pi} \quad (4.3)$$

Onde; B é a taxa de modulação, $D(\lambda)$ é o valor da dispersão, λ é o comprimento de onda do canal e c é a velocidade da luz.

A partir desta expressão, obtemos que na banda **C**, sinais modulados externamente à taxa de 2,5 Gb/s transmitidos por até ~ 900 km de fibra monomodo convencional não estão sujeitos a severas penalidades causadas por dispersão. Nessas condições, o aumento da capacidade de transmissão através do aumento do número de canais modulados na mesma taxa pode ser considerado uma boa estratégia. Para tanto, recai-se na escolha entre a redução do espaçamento entre canais, na banda **C** (o que pode levar as interações não-lineares indesejáveis) ficando sujeito a severas penalidades causadas pela dispersão. Tal problema é resolvido através da inclusão de fibras compensadoras de dispersão, que por sua vez introduzem perdas adicionais no enlace, o que justifica seu uso combinado com técnicas de amplificação Raman. A redução das

penalidades na transmissão é através do uso de fibra compensadora de dispersão e amplificação Raman, que permite compensar dispersão com baixas perdas.

O compensador de dispersão, e o bombeio Raman demonstrou ser um elemento estratégico para a melhoria de desempenho de sistemas de longa distância e pode ser usado também na atualização de sistemas ópticos para aumento de taxa de modulação.

Também neste trabalho, foi simulado o sistema de transmissão óptico terrestre sem repetição para aplicação no enlace Marabá – Santa Maria, com a eliminação da estação repetidora de Jacundá, com a finalidade de minimizar custos.

Pelo o que foi exposto, foi realizada a simulação do projeto Marabá - Santa Maria com bombeamento remoto para eliminação da repetidora de Jacundá e amplificação Raman, e sistema WDM com oito canais de 10 Gbit/s, e segundo a exigência da especificação mínima exigida para uma relação sinal / ruído óptico (OSNR) maior ou igual a 16 dB; conforme a especificação técnica PA-GER-COP-0102-ET, revisão 4; [31] referente ao backbone óptico DWDM – 2,5 Gbps / SDH 16 para atendimento ao Governo do Pará, anexo III – Termo de Referência; que determina a faixa dinâmica para o enlace óptico, para uma BER menor ou igual a 10^{-10} , e a máxima dispersão cromática de 18 ps/nm por km da fibra óptica, em 1550 nm; os resultados dos valores apresentados na simulação, das OSNRs e BERs, na Tabela 4.4, para os oito canais WDM de 10 Gbit/s na saída do demultiplexador, no final do enlace; o desempenho sistêmico para o enlace Marabá – Santa Maria com bombeamento remoto e amplificação Raman, foi satisfatório, ou seja, o sinal não sofreu degradação devido a efeitos não lineares como o Espalhamento Raman Estimulado (SRS) e Mistura de Quatro Ondas (FWM),

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 – Conclusão

O projeto de ampliação da capacidade do sistema de transmissão óptico do Tramo Oeste de 155 Mbps para WDM a oito canais de 2,5 Gbps, e consistindo também da eliminação da repetidora de Pacajá por meio da técnica de bombeamento remoto; e o projeto do sistema WDM de oito canais de 10 Gbps para o sistema Pará – Maranhão, referente ao trecho Marabá – Santa Maria, com a eliminação da estação repetidora de Jacundá, por bombeio remoto, e uso de amplificação Raman; implementam tecnologias WDM, que é a mais avançada da atualidade, e possui alta capacidade de transporte de informação, permitindo vários níveis de velocidade de 2 Mbit/s à Gbit/s.

Esta dissertação trata da análise crítica comparativa das simulações realizadas para o sistema óptico do Tramo Oeste; Pará – Maranhão (trecho Marabá – Santa Maria) e o sistema Navega Pará (backbone óptico DWDM – 2,5 Gbps / SDH STM -16; do convênio de cooperação técnica entre a Eletronorte e o Governo do Estado do Pará, implantado ao longo das linhas de transmissão, nas localidades próximas das subestações e repetidoras da Eletronorte).

Ao fazermos uma análise sobre as simulações que foram realizadas para os projetos ópticos acima mencionados; verificamos que as simulações realizadas para o sistema do Tramo Oeste; para o sistema Pará–Maranhão; e para o sistema Navega Pará, atenderam a especificação mínima exigida para uma relação sinal / ruído óptico (OSNR) maior ou igual a 16 dB; conforme a especificação técnica PA-GER-COP-0102-ET, revisão 4; [31] referente ao backbone (rota de longa distância) óptico DWDM – 2,5 Gbps / SDH 16, anexo III – Termo de Referência; cujo objetivo do dimensionamento do sistema óptico é determinar a faixa dinâmica do mesmo, para uma BER menor ou igual a 10^{-10} , e a máxima dispersão cromática de 18 ps/nm por km da fibra óptica, em 1550 nm.

Porém, a OSNR para o sistema Navega Pará, que se compõem dos respectivos trechos: Marabá – Santa Maria (20 a 21 dB); Tucuruí – Rurópolis (16 a 18 dB), Rurópolis – Itaituba (18 a 20 dB), e Rurópolis – Santarém (17 a 19 dB);

conforme se pode perceber, foi um pouco maior. A razão disso, é que o sistema Navega Pará, usa regeneração O-E-O (óptico – elétrico – óptico) em todas as estações do sistema, com exceção da estação de Jacundá; o que proporciona uma maior e melhor qualidade do sinal ao longo do sistema óptico, devido à reconstituição do sinal degradado ao longo da transmissão; e também porque, o processo de regeneração trata o sinal de forma tal, que toda a dispersão e o ruído, são removidos.

Para a simulação com amplificação totalmente óptica e bombeio remoto (estação sem repetição) para o Tramo Oeste, não se utiliza à regeneração O-E-O; e, no caso da amplificação óptica, os amplificadores apenas recebem o sinal e o amplifica, incluindo o ruído ASE e a dispersão presente. Entretanto, as vantagens dos sistemas com bombeamento remoto (sistemas sem repetição), mostram que são mais simples, mais barato, e de fácil instalação; e não são sensíveis à codificação usada na fibra; isto é, a característica mais importante da amplificação óptica, é a sua transparência, pois é independente da taxa de bit e do formato de modulação; conseguindo-se transmissão de sinais de multigigabits por segundo, sobre distâncias de vários quilômetros. Já os repetidores regenerativos O-E-O são muito complexos e mais caros que os amplificadores ópticos. Outra grande vantagem é a eliminação da estação repetidora de Pacajá, devido à redução de custos, que disso advém; quando comparado à instalação, operação e manutenção de estações repetidoras, visto que a construção, alimentação e manutenção dessas estações para os níveis dos sinais ópticos a serem recuperados, são tarefas de extrema complexidade, por apresentarem custos bastante altos quando da sua implantação. Ainda, por outro lado, os sistemas sem repetição, oferecem extrema facilidade para um futuro upgrade na taxa de transmissão ou adição de canais, que é bem mais difícil na regeneração O-E-O, por ser mais complexa.

Com relação ao projeto Marabá – Santa Maria WDM a oito canais de 10 Gbit/s, bombeamento remoto para eliminação da estação repetidora de Jacundá e uso de amplificação Raman; comparado com o projeto Navega Pará; o primeiro se torna bem competitivo, já pelas razões expostas, relacionadas aos custos

advindos devido à eliminação da estação repetidora de Jacundá; pela utilização da amplificação Raman, que em muito melhora a OSNR, e como já dito anteriormente, tem melhor flexibilidade e facilidade para upgrade futuros; para a taxa de transmissão ou adição de canais.

Os fatores que despertam interesses, no uso de bombeamento remoto (estação sem repetição), para substituir estações repetidoras, além do dimensionamento de todo o sistema óptico, usando essa técnica de bombeio remoto, são devido por exemplo, os locais onde as estações repetidoras são construídas, serem geralmente ingremes ou de difícil acesso, ações de vandalismo nas estações desassistidas, perigos de assaltos a que os técnicos e engenheiros ficam expostos, ao se deslocarem grandes distâncias em estradas de terra pela Transamazônica até a estação repetidora para efetuar inspeções e manutenções periódicas gerais na mesma, muito principalmente no sistema de refrigeração da estação, onde na maioria das vezes são usados grupos motores geradores a diesel, que freqüentemente são inspecionados e abastecidos num período quase que constante; que no conjunto em geral, promovem custos elevados para a Eletronorte.

O custo aproximado de implantação de estações repetidoras chega a R\$ 1.200.000,00, ou mais; o custo aproximado operacional de repetidoras chega a R\$ 100.000,00 ou mais, por ano; enquanto que o custo aproximado de implantação de sistemas ópticos sem repetição é menor que R\$ 300.000,00 (principal e reserva).

Com a expansão da capacidade de transmissão do sistema óptico do Tramo Oeste para WDM a oito canais de 2,5 Gbps; e do trecho Marabá – Santa Maria, do sistema óptico Pará - Maranhão, para oito canais de 10 Gbps; poderá ser atendida uma demanda em termos de serviços de telecomunicações, e também ser feita a comercialização desses serviços. O tipo de tráfego existente no mercado a ser oferecido e inserido na rede WDM, poderá ser: Fast-Ethernet, 10/100 Base T, Gigabit-Ethernet, E1 (G.703), FICON, ESCON, PDH (2M/34M/140M), SDH (STM-1/4/16), Fiber Chanel, Ethernet, e SAN (Storage Área Network).

Logicamente, que para a implementação de um sistema WDM, o fator custo envolvido é consideravelmente elevado; mas, considerando que por parte da Eletronorte, o aluguel das fibras reservas trará lucros de expressivo valor; sem dúvida nenhuma, valerá a pena investir na expansão da capacidade dos sistemas ópticos.

Paralelamente a este projeto de ampliação da capacidade do sistema óptico do Tramo Oeste de 155 Mbps, para oito canais de 2,5 Gbps, por meio da tecnologia WDM; e eliminação da repetidora de Pacajá, por meio da técnica de bombeamento remoto; e também do projeto do sistema WDM de oito canais de 10 Gbps para o sistema Pará – Maranhão, referente ao trecho Marabá – Santa Maria; com a eliminação da estação repetidora de Jacundá; por bombeio remoto e amplificação Raman, foi feito em comparação com estes projetos, um estudo e análise crítica, com o projeto Navega Pará, implantado ao longo das linhas de transmissão, nas localidades próximas das subestações e repetidoras da Eletronorte.

A implantação do WDM permite transmitir volumes de dados até então inimagináveis; tudo isto em uma única fibra óptica, o que é muito importante para um mercado que cada vez mais exige maiores larguras de banda, em suas aplicações. Com tantas vantagens técnicas, econômicas e logísticas, a tecnologia WDM preparou o mercado para as redes fotônicas.

Uma vez implantada a infraestrutura de telecomunicações, o Estado do Pará estará dotado de todos os recursos de telecomunicações para melhorar a eficiência do serviço público. A infraestrutura criada é bastante flexível tanto na configuração dos STMs, quanto na criação de redes independentes. A Eletronorte terá benefícios tanto na utilização de seus próprios serviços de telecomunicações quanto na venda de serviços excedentes. O projeto disponibilizará de tecnologias novas em telecomunicações, como o WDM e o bombeamento remoto.

Então, para minimizar custos, otimizar investimentos, e participar do desenvolvimento das telecomunicações, as Centrais Elétricas do Norte do Brasil – Eletronorte, implantou sistemas ópticos nas linhas de transmissão (cabo OPGW – *Optical Ground Wire*), para aumentar a confiabilidade e também ampliar e

flexibilizar as comunicações, oferecendo serviços que há muitos anos atrás não se cogitava.

5.2 - Propostas para Trabalhos Futuros

- Estudo da utilização de amplificação Raman em sistemas ópticos de longa distância.
- Estudar o desenvolvimento de técnicas de combate ao efeito da PMD, que é um fator limitador em sistemas DWDM para maiores taxas de dados em enlaces de longa distância.
- Estudar a transmissão de solitons por fibra óptica, como uma solução estável de propagação. A sua principal característica é anular a dispersão cromática nas fibras ópticas.
- Estudo aprofundado das características de não linearidades da fibra óptica, para melhoramento do desempenho de sistemas DWDM.
- Analisar o desempenho do sistema, com uso do FEC. Analisar o relaxamento das especificações dos amplificadores com o uso de FEC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Antônio José Martins Soares. “Comunicações Ópticas”. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica. Setembro \ 2005.
- [2] M. Murakami, H. Maeda, T. Imai, “Long haul 16 X 10 Gb/s WDM transition experiment using higher order fiber dispersion management technique,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no 7, pp. 898-900, Jul. 1999.
- [3] M.I. Hayee, A.E. Willner, “Transmission penalties due to EDFA gain transients in adddrop multiplexed WDM networks,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no 7, pp. 889-891, July. 1999.
- [4] N.S. Kapany, *Fiber Optics: Principles and Applications*, Academic Press, New York, 1967.
- [5] Daniella Melo Ribeiro. Marlúcia Vieira de Araújo. “WDM – Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda”. Universidade Federal de Goiás. Escola de Engenharia Elétrica. 27 de fevereiro de 2003.
- [6] Miriam R. X. de Barros, João B. Rosolem, Mônica L. Rocha, “Sistemas DWDM”, Caderno de Treinamento, CPqD - Telecom & IT Solutions, Brasil, 2000.
- [7] G. P. Agrawal, “Fiber-optic communication systems”, Wiley-interscience, 1992
- [8] P. E. Green, “Fiber optics networks”, Prentice-Hall, New Jersey, 1993.
- [9] R. Ramaswami e K. N. Sivarajan, “Optical Networks - A Practical erspective”, 1a ed., Morgan Kaufmann, EUA, 1998.
- [10] T. E. Stern e K. Bala, “Multiwavelength Optical Networks”, 1a ed., Addison-Wesley, EUA, 1999.
- [11] S. Sudo, “Optical Fiber Amplifiers – Material, Devices, and Applications”, 1a ed., Artech House, EUA, 1997.
- [12] [http:// www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialraman](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialraman). Seção: Tutoriais Redes Ópticas. Amplificadores Raman.
- [13] Miriam R. X. de Barros, João B. Rosolem, Mônica L. Rocha, “Sistemas DWDM”, Caderno de Treinamento, CPqD - Telecom & IT Solutions, Brasil, 2000.

- [14] Govind P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", 2nd Edition, Academic Press, USA, 1995.
- [15] Moisés Renato Nunes Ribeiro. "Padrões de Taxa de Erros em Enlaces Ópticos de Alta Velocidade". Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica. Departamento de Engenharia Elétrica.
- [16] Eduardo Mobilon. "Análise Experimental das Aplicações de Códigos Corretores de Erro em Sistemas de Comunicações Ópticas". Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Departamento de Microondas e Óptica. Dezembro / 2003.
- [17] [http:// www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialdwdm/default.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialdwdm/default.asp). Seção: Tutoriais Redes Ópticas. Sistemas DWDM: Visão Sistêmica Atual
- [18] Govind P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems", 2nd Edition, John Wiley & Sons, USA, 1997.
- [19] F.P. Kapron, D. B. Keck, and R. D. Maurer, "Radiation losses in glass optical waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 17, pp. 423–425, 1970.
- [20] Ivan Kaminow, Tingye Lie. "Optical Fiber Telecommunications – Systems and Impairments IVB". Academic Press. 2002.
- [21] Govind P. Agrawal. "Fiber communication Systems". John Willey & Sons. Inc. 1997.
- [22] Clenilson Rodrigues da Silveira. "Simulação de Redes Ópticas Utilizando o Software Optisystem: Estudo de Casos para Redes WDM e SCM. Universidade Federal do Pará. Centro Tecnológico. Departamento de Engenharia Elétrica. 1^o Semestre / 2006.
- [23] Vivek Alwayn, CCIE N^o 2995. "Optical Network Design and Implementation". Cisco Press. 2004.
- [24] R. W. Tkack et al., "Four-photon mixing and high speed WDM systems", *Journ. Lightwave Tech*, vol. 13, No. 5, maio 1995.
- [25] Gerd Keiser. "Optical Fiber Communications". Terceira Edição. McGrawHill International Editions. 2000.

- [26] D.N. Payne and W.A. Gambling: "New silica-based low-loss optical fibre," *Electron. Lett*, 10, pp. 289-290, 1974.
- [27] D.L. Lee, *Electromagnetic Principles Of Integrated Optics*, Krieger Publishing Company, 1986.
- [28] R. W. Lucky, J. Sltz e E.J.J Weldom "Principles of data communications", McGraw-Hill, 1965.
- [29] Simon Haykin, "An Introduction to Analog and Digital Communications", John Wiley & Sons, Republic of Singapore, 1989.
- [30] [http:// www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialdwdm](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialdwdm). Seção: Tutoriais Redes. DWDM FEC.
- [31] Backbone Óptico DWDM – 2,5 Gbps / SDH STM 16 para Atendimento ao Governo do Pará. Anexo III – Termo de Referência. Especificação Técnica Nº PA-GER-COP-0102-ET - Revisão 4.
- [32] Especificação Técnica PA-GER-COP-0106-ET – Revisão 1. Implantação de Cabos Ópticos Auto-Sustentados em Aproximações Ópticas entre Sites Eletronorte-Prodepa (Governo do Pará).
- [33] Proposta 0789-2007 V 02.00 – PADTEC S.A
- [34] Domingos Sávio dos Reis; Romel Domingues; Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A - Eletronorte. Miriam R.X. de Barros; João Batista Rosolem; CPqD. "Amplificadores Ópticos Passivos a Fibra Dopada com Érbio e Bombeamento Remoto". SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Outubro / 2003. Uberlândia – Minas Gerais.
- [35] L. Eskildsen, P.B. Hansen, S.G. Grubb, V.L. da Silva, "Remote postamplifiers in repeaterless transmission systems", *Electronics*
- [36] J.B.Rosolem, M.R.X. de Barros, S.M.Rossi, A. A. Juriollo, M.L. Rocha, "Limites de Potência Transmitida em Sistemas Ópticos sem Repetição", Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Microondas e Optoeletrônica, SBMO '2002 (2002).
- [37] Miriam Regina Xavier de Barros (1), João Batista Rosolem (1), Roberto Arradi (1), Sandro Marcelo Rossi (1), Antonio Amauri Juriollo (1), Jaime Alexandre (1),

Eduardo Mobilon (1), Domingos Sávio dos Reis (2), Romel Domingues (2), Jose Vicente Fior (2), José Carlos Schumann de Melo (2), Renner Sousa Ferreira (2), Marcelo Barbosa (2) (1) CPqD Telecom & IT Solutions, SP 340 km 118.5, 13086-902, Campinas, SP, Brazil (2) Centrais Elétricas do Norte do Brasil S. A. “Sistema de Transmissão Óptico Terrestre de Longa Distância sem Estações de Repetição” – 2003.

[38] Ridgway, D.N, “Effects of Higher Power Levels on Optical Connectors, Splices, and Related Components”, National Fiber Optic Engineers Conference – NFOEC 2001, p561-572, 2001.

[39] H. Waldman, M. R. N. Ribeiro e A. A. Surerus, “The digital transmission link with a single optical amplifier”, SBT/IEEE International Telecommunication Symposium, Rio de Janeiro, Agosto de 1994.

[40] A.F. Elrefaire, R.E. Wagner, D.A. Atlas, D.G. Daut, “Chromatic Dispersion Limitation in Coherent Lightwave Systems”, Journal of Lightwave Technology, vol. 6, pp. 704 – 709, 1988.

Apêndice A

A1

Data Sheet
DW-902
August, 2003



Polarization Beam Combiner

Product type: DW-902



Applications

High power laser diode multiplexing application for pumping source of EDFA and Raman amplifier in WDM network.

Description

- DW902 is three-port polarization beam combiner with optical crystal.
- Also could be used as Polarization splitter.

Features

- Extremely low insertion loss. : 0.25dB Typical
- Flat insertion loss spectrum.
- High reliability using YAG laser welding and Epoxy-free optical path.
- Telcordia GR-1209, GR-1221 Qualified.

Environmental conditions

Parameter	Unit	Min	Typ	Max	Remarks
Storage Temperature	°C	-40	-	85	No dew condensation
Operating Temperature	°C	0	-	70	No dew condensation
Maximum Optical Power *1)	mW	---	---	1000	3W, 70°C, 90%RH × 1000hour test passed

Note *1) Connector type is not available.

Optical Characteristics

Item	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Operating Wavelength	λ	Type Number: DW902-V2-	1420	-	1460	nm
		Type Number: DW902-V1-	1460	-	1500	nm
		Type Number: DW902-V3-	1530	-	1570	nm
Insertion Loss	IL	at Operating Temperature		0.25	0.50	dB
Return Loss	RL		50	-	-	dB

FSDS-008-G

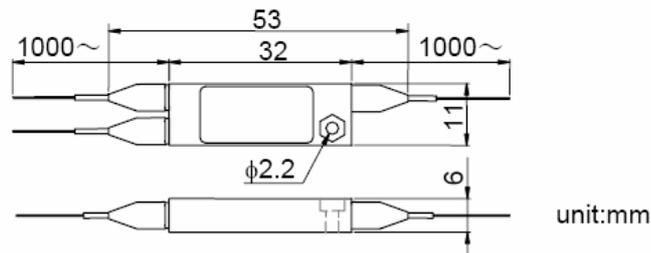
Data Sheet DW-902

August, 2003

Block diagram



Outline Drawings



[Fiber specs.]

INPUT	Furukawa ϕ 0.4mm coating PM-fiber	Equivalent to SM.15-P-8/125-UV/UV-400
OUTPUT	ϕ 0.25mm coating SM-fiber	ITU-T G.652

Ordering Information

DW902- V - - /

Wavelength Range		Extinction Ratio (Port 1 & 2) *1)		Connector Type *2) (Port 1&2)		Polishing Type (Port 1&2)		Connector Type (Port 3)		Polishing Type (Port 3)	
Symbol		Symbol		Symbol		Symbol		Symbol		Symbol	
1	1460 – 1500	17	17 dB	FC	FC	S	SPC	FC	FC	S	SPC
2	1420 – 1460	26	26 dB	SC	SC	A	APC	SC	SC	A	APC
3	1530 – 1570			N	N			N	N		

Note *1) Connectorization is not Available with 26dB option

Note *2) Polarization axis : The stress producing members are perpendicular to the key.

Furukawa Electric reserves the right to improve, enhance and modify the features and specifications of FITEL products without prior notifications.

FITEL[®]

Japan Head Office

2-2-3, Marunouchi
Chiyoda-ku
Tokyo 100-8322, JAPAN
Tel: +81-3-3286-3133
Fax: +81-3-3286-3708
<http://www.furukawa.co.jp>
Email: comsales@ho.furukawa.co.jp

North America Furukawa America Inc.

200 Westpark Drive, Suite 190
Peachtree City, GA 30269
Tel: 770-487-1234
Toll-Free: 1-866-GO-FITEL(463-4835)
Fax: 770-487-9910
<http://www.furukawaamerica.com>
oesales@FurukawaAmerica.com

Europe Furukawa Electric Europe Ltd.

3rd Floor, Newcombe House
43-45 Notting Hill Gate
London W11 3FE, UK
Tel: +44-20-7221-6000
Fax: +44-20-7313-5310
<http://www.furukawa-fitel.co.uk>
E-mail: sales@furukawa-fitel.co.uk

Data Sheet
 FOL1405Rxy / 1480nm Pump Laser Module
 Date DEC.22.2004 ODC-2C001D



1480nm Pump LDM up to 320mW



Applications

- Pump Source for Er-Doped Fiber Amplifier
 - C- and/or L-Band EDFA
 - Single Channel Amp to DWDM Amp
- Pump Source for Raman Amplifier

Description

- The FOL1405R series has been designed for use in a wide variety of optical amplifier, such as EDFA or Raman Amplifier used in optical transmission systems, especially in dense wavelength-division-multiplexing (DWDM) systems.
- A strained multi-quantum well laser diode chip is integrated with thermo-electric cooler (TEC), thermistor and PIN photodiode in a hermetically sealed 14 pin butterfly package.
- A 2-lens-system couples a round shape light from the laser chip efficiently to the fiber and enables the output power up to 320 mW.
- This laser module complies with telecom requirements described in Telcordia™ GR-468 requirement and manufactured in an ISO™9001 certified production line.

Features

- Rated output power up to 320 mW (CW)
- Widely deployed reliable package design with industry compatible 14 pin butterfly footprint
- Internal Thermo-electric cooler (TEC) and Thermistor for stable operation
- Integrated PIN photodiode for back facet monitor
- Internal optical Isolator (optional)
- Single mode fiber and Polarization maintaining fiber pigtail
- Wavelength stabilization available with external FBG (optional, PM fiber only)
- Epoxy free design inside the module for long term Reliability

Data Sheet

FOL1405Rxy / 1480nm Pump Laser Module
ODC-2C001D Date DEC.22.2004

Absolute Maximum Ratings

Parameters	Sym.	Min.	Max.	Unit	Parameters	Sym.	Min.	Max.	Unit
Storage Temperature	Tstg	-40	85	°C	PD Forward Current	IfPD	-	5	mA
Operating Case Temperature	Tc	-20	70	°C	PD Reverse Voltage	VrPD	-	20	V
LD Forward Current	If	-	1600	mA	TEC Current	Ic	-1.1	4.5	A
LD Reverse Voltage	Vr	-	2	V	TEC Voltage	Vc	-	4.5	V

Optical and Electrical Specifications (Sensor Temperature (Ts) = 25°C)

Parameters	Sym.	Min.	Typ.	Max.	Unit	Conditions
Output Power	Pf ¹⁾	250	-	-	mW	IfBOL=<1100mA,
FOL1405RRO		260	-	-		
FOL1405RRP		270	-	-		IfBOL=<1200mA,
FOL1405RSA		280	-	-		
FOL1405RSB		290	-	-		IfBOL=<1300mA,
FOL1405RTC		300	-	-		
FOL1405RTD		320	-	-		
Center Wavelength(FP)	λ_c	1460	-	1490	nm	RMS(-20dB), Rated Power
Center Wavelength(FBG)	$\lambda_c^{2)}$	$\lambda_c-1.5$	λ_c	$\lambda_c+1.5$	nm	RMS(-20dB), Rated Power
Spectral Width(FP)	$\Delta\lambda$	-	-	8	nm	RMS(-20dB), Rated Power
Spectral Width(FBG)	$\Delta\lambda$	-	-	3	nm	RMS(-20dB), Rated Power
LD Operating Forward Voltage	Vf	-	-	2.6	V	Rated Power
LD Forward Current at EOL	IfEOL	-	-	1.2xIfBOL	mA	End of Life
Monitor Current	Im	100	-	2000	μ A	VrPD=5V, Rated Power
Monitor Dark Current	Id	-	-	100	nA	VrPD=5V
Extinction Ratio	Re	16	-	-	dB	Type4 and Type6
Isolation	Iso	30	-	-	dB	Type3 and Type4
TEC Spec.	-	Refer to below			-	-
Thermistor Resistance	Rth	9.5	10	10.5	k Ω	Ts=25°C
Thermistor B Constant	Bth	-	3900	-	K	Ts=25°C

1)Pf; Available Pf may depend upon center wavelength selected.
2) λ_c ; Selected center wavelength from 1420nm to 1510nm available.

Thermo-Electric Cooler Characteristic & Power Consumption

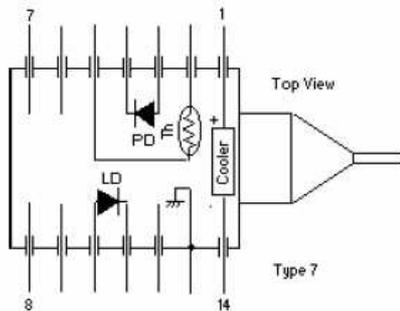
Part Number	Itec[A]	Vtec[V]	4) Ptotal[W]	Condition
RR* series Pf=250 to 260[mW]	2.5	3.2	10.5	Max. Val, Ts=25°C, Δ T=45°C, IfEOL
RS* series Pf=270 to 280[mW]	2.7	3.4	12.3	Max. Val, Ts=25°C, Δ T=45°C, IfEOL
RT* series Pf=290 to 320[mW]	2.9	3.7	14.1	Max. Val, Ts=25°C, Δ T=45°C, IfEOL

4) Ptotal = Wtec + Wld (Total Power Consumption)

Data Sheet

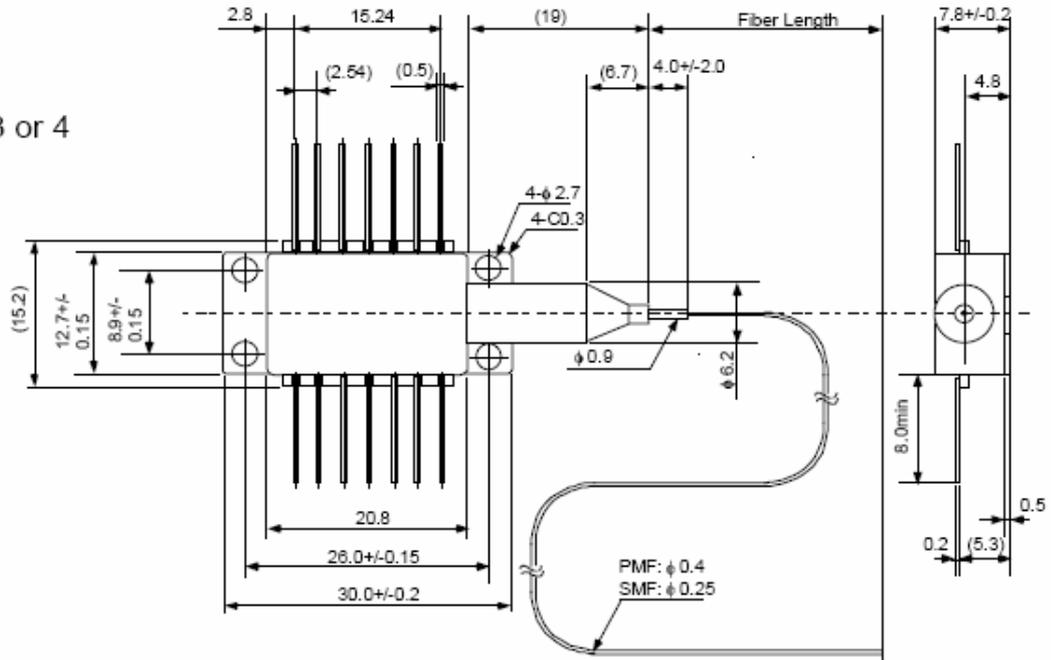
FOL1405Rxy / 1480nm Pump Laser Module
ODC-2C001D Date DEC.22.2004

Dimensions & Pin Assignment



Pin#	Function	Pin#	Function
1	Cooler(+)	8	No Connection
2	Thermistor	9	No Connection
3	PD anode(-)	10	LD anode(+)
4	PD cathode(+)	11	LD cathode(-)
5	Thermistor	12	No Connection
6	No Connection	13	Case GND
7	No Connection	14	Cooler(-)

Type 3 or 4



Type 6(FBG)

