



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE COMUNICAÇÕES

Dissertação de Mestrado

PROJETO DE REDES TRANSLÚCIDAS DE LONGA DISTÂNCIA

Autor:

Agostinho Linhares de Souza Filho

Orientador:

Prof. Dr. Helio Waldman

Área de Concentração:

Telecomunicações e Telemática

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Helio Waldman (Presidente)

Prof. Dr. Edson Moschim

Prof. Dr. Raul Vinhas

Prof. Dr. Moisés R. N. Ribeiro

DECOM – FEEC – UNICAMP

DT – FEEC – UNICAMP

DSIF – FEEC – UNICAMP

DEL - UFES

Campinas, 30 de junho de 2003

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

So89p Souza Filho, Agostinho Linhares
Projeto de redes translúcidas de longa distância /
Agostinho Linhares de Souza Filho.--Campinas, SP:
[s.n.], 2003.

Orientador: Helio Waldman
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Comunicações óticas. 2. Fibras óticas. 3.
Telecomunicações. 4. Redes de longa distância (Redes
de computação). 5. Programação linear. I. Waldman,
Helio. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
III. Título.

Resumo

Está se tornando um consenso que uma rede totalmente óptica de longa distância é dificilmente factível devido a uma série de dificuldades em compensar degradações na transmissão introduzidas por não-linearidades, dispersão cromática, PMD (*polarization mode dispersion*), ruído acumulado devido à ASE (*amplified spontaneous emission*), entre outras. Por estas razões, é amplamente aceito que uma rede óptica de nova geração será um híbrido entre a rede opaca (com regeneração de todos os sinais em cada nó) e a transparente (sem regeneração do sinal em nenhum nó intermediário do percurso do caminho óptico). Este modelo de rede híbrida recebeu o nome de rede translúcida[19][28]. Algumas estratégias para o projeto de redes translúcidas de longa distância foram propostas em artigos e livros como [19][28][29][30]. Este trabalho desenvolve métodos de projeto para estas redes translúcidas utilizando programação linear inteira e inteira mista e um algoritmo de peso transicional. Três métodos de projeto são estudados.

O primeiro utiliza uma abordagem mais clássica, onde realiza-se primeiro o projeto de topologia de caminhos ópticos (LTD), para depois fazer o roteamento e alocação de comprimentos de onda (RWA).

O segundo considera que a matriz de tráfego já fornece o tráfego em termos de caminhos ópticos, logo é necessário resolver somente o RWA, e como minimizar o custo de implantação de um rede de comunicação é um parâmetro importantíssimo, este RWA é resolvido de tal forma a minimizar o número de regeneradores no sistema, pois estes contribuem sobremaneira nos custos de cada nó.

O último método escolhe, através de um algoritmo de peso transicional, nós hubs, que são dotados da capacidade de regeneração e (de)multiplexação de tráfegos, e ilhas de transparências, que são conjuntos de nós totalmente ópticos. A motivação deste método está associada à forte não-uniformidade espacial do tráfego em redes de longa distâncias em muitos países, inclusive o Brasil.

Palavras Chaves: DWDM, LTD, Redes Translúcidas de Longa Distância, Redes Ópticas, Regeneração, RWA.

ABSTRACT

It is widely believed that an all-optical wide-area network is hardly feasible due to difficulty in overcoming transmission impairments introduced by nonlinearities; chromatic and polarization-mode dispersion; noise accumulated due to ASE and other degradations. It is widely accepted that a next-generation optical network will have both opaque (a signal is regenerated in each node) and transparent (a lightpath is not regenerated in none of the intermediate nodes of its path) nodes. This hybrid model has received the name of translucent network [19][28]. Some strategies for designing translucent wide-area networks were proposed in papers and books like [19][28][29][30]. This work developed design methods for translucent wide-area networks using integer linear programming and mixed-integer linear programming, and a transitional weight algorithm. Three designing methods are studied.

The first method considers a classical approach, where the lightpath topology design (LTD) is solved first, and then the routing and wavelength assignment (RWA) is done.

The second method considers that the traffic matrix is given in terms of lightpaths, consequently just RWA needs to be solved. The RWA is solved trying to minimize the number of regenerators in the system, doing this, the node cost is mitigated.

The last method chooses hub nodes using a transitional weight algorithm and transparency islands. The hub nodes are able to realize grooming and regeneration. The main motivation of this method is the strong non-uniform spacial traffic in many countries wide-area networks, including Brazil.

Keywords: DWDM, LTD, Optical Networks, Regeneration, RWA, Translucent Wide-Area Network.

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado aos meus pais e irmãs que me apoiaram durante todo período do mestrado, e durante toda minha vida.

AGRADECIMENTOS

Aos professores da FEEC que contribuíram para o enriquecimento do meu conhecimento, principalmente ao orientador Helio Waldman, que sempre que possível esteve presente ajudando no desenvolvimento desta dissertação.

Aos meus amigos da OPTINET pelo apoio e ajuda nesta dissertação, principalmente ao Karcus que proporcionou bastantes discussões sobre programação linear.

Aos meus amigos do LRPRC pelos momentos alegres de descontração.

À Celi e Eloísa pelo excelente suporte prestado durante o período do mestrado.

Aos professores João Crisóstomo e Luiz Affonso, ambos da UFPa, que apoiaram minha vinda à Unicamp.

Ao CNPQ e à Ericsson Telecomunicações S.A. pelo apoio financeiro.

ÍNDICE

| | | |
|-------------|---|----------|
| 1 | Introdução..... | 1 |
| 1.1 | Escopo da Dissertação..... | 3 |
| 2 | Componentes e Tecnologias..... | 4 |
| 2.1 | Fibras Ópticas..... | 4 |
| 2.1.1 | Propagação da Luz nas Fibras Ópticas..... | 5 |
| 2.1.2 | Tipos de Fibras Ópticas..... | 6 |
| 2.2 | Restrições da Camada Física..... | 7 |
| 2.2.1 | Atenuação..... | 8 |
| 2.2.1.1 | Absorção Material..... | 8 |
| 2.2.1.2 | Espalhamento..... | 9 |
| 2.2.2 | Distorção..... | 9 |
| 2.2.2.1 | Dispersão (Distorção Linear)..... | 10 |
| 2.2.2.1.1 | Intermodal..... | 10 |
| 2.2.2.1.2 | Intramodal..... | 10 |
| 2.2.2.1.2.1 | Cromática..... | 10 |
| 2.2.2.1.2.2 | PMD (<i>Polarization Mode Dispersion</i>)..... | 11 |
| 2.2.2.2 | Distorção Não-Linear..... | 12 |
| 2.2.2.2.1 | SPM/XPM (Self-Phase Modulation/Cross-Phase Modulation)..... | 13 |
| 2.2.2.2.2 | FWM (Four-Wave Mixing)..... | 13 |
| 2.2.2.2.3 | Espalhamento de Raman e de Brillouin..... | 14 |
| 2.2.3 | Ruído..... | 14 |
| 2.3 | Sóliton..... | 15 |
| 2.4 | Lasers..... | 16 |
| 2.5 | Fotodetectores..... | 17 |
| 2.6 | (D)WDM..... | 18 |
| 2.7 | Amplificadores Ópticos..... | 19 |
| 2.8 | Conversores de Comprimento de Onda..... | 20 |
| 2.9 | Filtros Ópticos..... | 21 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.10 | Transponder..... | 22 |
| 2.11 | OLT..... | 23 |
| 2.12 | OADM..... | 23 |
| 2.13 | OXC..... | 24 |
| 2.14 | Balanco de Potência..... | 26 |
| 3 | Arquiteturas de Redes Ópticas e Camadas Clientes..... | 29 |
| 3.1 | Modelo de Referência OSI..... | 29 |
| 3.2 | SDH/SONET..... | 30 |
| 3.2.1 | Camadas SDH/SONET..... | 31 |
| 3.2.2 | Elementos de uma Infraestrutura SDH/SONET..... | 32 |
| 3.2.3 | Considerações Finais Sobre SDH/SONET..... | 32 |
| 3.3 | ATM..... | 33 |
| 3.3.1 | Camadas ATM..... | 33 |
| 3.3.2 | Interfaces ATM..... | 35 |
| 3.3.3 | Considerações Finais Sobre ATM..... | 35 |
| 3.4 | IP..... | 35 |
| 3.5 | MPLS..... | 37 |
| 3.5.1 | Modelo <i>Overlay</i> e Modelo <i>Peer</i> | 37 |
| 3.5.2 | Conceitos Básicos..... | 39 |
| 3.5.3 | Engenharia de Tráfego e IP/MPLS..... | 39 |
| 3.6 | Camada Óptica..... | 40 |
| 3.6.1 | ITU-T Digital <i>Wrapper</i> | 41 |
| 3.7 | Arquiteturas de Redes Ópticas..... | 42 |
| 3.7.1 | Possível Arquitetura de um Nó da Rede Óptica..... | 43 |
| 4 | Projeto de Redes Translúcidas de Longa Distância..... | 46 |
| 4.1 | Os Problemas de LTD e RWA..... | 47 |
| 4.1.1 | LTD (<i>Lightpath Topology Design</i>)..... | 48 |
| 4.1.2 | RWA (<i>Routing and Wavelength Assignment</i>)..... | 50 |
| 4.2 | Projeto de Uma Rede Hipotética Brasileira de Ultra Longa Distância..... | 53 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.3 | Projeto de Uma Rede Hipotética de Longa Distância na Região Sudeste..... | 59 |
| 4.3.1 | Resolução do RWA <i>Offline</i> | 60 |
| 4.3.2 | Resolução do RWA <i>Online</i> | 64 |
| 4.4 | Projeto de Uma Rede Translúcida Utilizando Ilhas de Transparência..... | 66 |
| 5 | Conclusões e Investigações Futuras..... | 79 |
| 5.1 | Investigações Futuras..... | 80 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Fig. 1.1: Aplicação da Tecnologia de Rede Óptica. Redes de acesso estão conectadas a nós de uma rede metropolitana, que por sua vez estão interligadas a nós de uma rede de longa distância..... | 2 |
| Fig. 2.1: Núcleo e casca de uma fibra óptica..... | 4 |
| Fig. 2.2: Luz entrando com um ângulo menor ou igual ao ângulo de abertura do cone, $\theta \leq \alpha$ (ângulo de aceitação), propaga pela fibra..... | 5 |
| Fig. 2.3: Amplificador a Fibra Dopada com Érbio..... | 20 |
| Fig. 2.4: Diagrama de blocos de um OLT com diferentes clientes da rede óptica que utilizam ou não o padrão ITU de λ . O OLT termina um canal de supervisão óptico (OSC) usado no enlace de fibra..... | 23 |
| Fig. 2.5: Diagrama de blocos de um OADM: (a) configuração genérica. (b) exemplo de <i>add/drop</i> de um único λ com um ADM SDH/SONET conectado..... | 24 |
| Fig. 2.6: OXC com núcleo óptico..... | 26 |
| Fig. 3.1: Camadas do SDH..... | 31 |
| Fig. 3.2: Arquitetura do Protocolo ATM..... | 34 |
| Fig. 3.3: O IP numa arquitetura em camadas..... | 36 |
| Fig. 3.4: Modelo de uma rede para a comutação IP..... | 38 |
| Fig. 3.5: Sub-camadas da camada óptica..... | 41 |
| Fig. 3.6: Estrutura de um <i>digital wrapper</i> | 42 |
| Fig. 3.7: Arquiteturas possíveis para a integração IP/WDM. Evidentemente ao invés do SDH, pode-se utilizar o SONET..... | 42 |
| Fig. 3.8: Possível Arquitetura de um Nó em uma Rede Óptica..... | 44 |
| Fig. 4.1: Passos de projeto..... | 47 |
| Fig. 4.2: Rede Hipotética Brasileira..... | 54 |
| Fig. 4.3: Valores de congestionamento em função do número de portas..... | 55 |
| Fig. 4.4: Somatória da distância de todos os caminhos ópticos..... | 57 |
| Fig. 4.5: Uma rede de longa distância com 8 nós. Os números nos enlaces representam a distância em múltiplos de 100 km entre os nós..... | 59 |

| | |
|---|----|
| Fig. 4.6: Somatória da distância de todos os caminhos ópticos (unidirecional) em função do número de λ 's..... | 64 |
| Fig. 4.7: Número de regeneradores (apenas em uma direção) em função do número de λ 's..... | 64 |
| Fig. 4.8: Rede ANSP modificada com 15 nós. Os números nos enlaces representam a distância em múltiplos de 100 km entre os nós..... | 66 |
| Fig. 4.9: Somatória da distância de todos os caminhos ópticos (unidirecional) em função do número de λ 's..... | 70 |
| Fig. 4.10: Número de regeneradores (apenas em uma direção) em função do número de λ 's..... | 70 |
| Fig. 4.11: Distribuição de PT na ANSP..... | 72 |
| Fig. 4.12: ANSP com 2 nós hubs e respectivas ilhas de transparência..... | 73 |
| Fig. 4.13: ANSP com 3 nós e respectivas ilhas de transparência..... | 75 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tab. 2.1: Valores típicos de sensibilidade e sobrecarga para diferentes tipos de fotodetectores..... | 17 |
| Tab. 2.2: Diferentes bandas (janelas) nas fibras ópticas. As faixas de λ são aproximadas e ainda não foram padronizadas..... | 19 |
| Tab. 2.3: Um exemplo de projeto que aloca penalidades de potência para várias degradações de transmissão..... | 27 |
| Tab. 3.1: Taxas de transmissão para os sinais PDH..... | 30 |
| Tab. 3.2: Taxas de transmissão para os sinais SDH/SONET..... | 31 |
| Tab. 4.1: Matriz de tráfego para a rede hipotética brasileira..... | 54 |
| Tab. 4.2: Valores de $b_{1(i,j)}$ encontrados com a resolução do LTD..... | 56 |
| Tab. 4.3: Valores de $b_{2(i,j)}$ encontrados com a resolução do LTD..... | 56 |
| Tab. 4.4: Matriz de Tráfego utilizada para resolver o RWA..... | 57 |
| Tab. 4.5: Rota e comprimento de onda alocado para alguns dos caminhos ópticos. A coluna das distâncias representa múltiplos de 100 km..... | 58 |
| Tab. 4.6: Matriz de tráfego da rede hipotética do sudeste. O tráfego é bidirecional e simétrico e está mostrado em termos de caminhos ópticos de 10 Gbps no triângulo superior desta matriz..... | 60 |
| Tab. 4.7: Solução do RWA <i>offline</i> para 7 λ 's da rede hipotética do Sudeste..... | 61 |
| Tab. 4.8: Solução do RWA <i>offline</i> para 10 λ 's da rede hipotética do Sudeste..... | 62 |
| Tab. 4.9: Matriz de tráfego da Fig. 4.7, onde cada unidade representa um múltiplo da taxa STM-1 (155 Mbps). A matriz de tráfego foi preenchida formando uma matriz triangular, pois o tráfego é bidirecional..... | 67 |
| Tab. 4.10: Solução do RWA <i>offline</i> para 13 λ 's da rede ANSP..... | 68 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------------------------|---|
| $b_{q(i,j)}$ | Variável binária, 1 se existe um q-ésimo caminho óptico do nó i para o nó j . |
| $c_{i,j}$ | Distância do enlace i - j . |
| $L_{i,j}$ | Número máximo de comprimentos de onda que pode passar pelo enlace i - j . |
| λ_{\max} | Máximo tráfego oferecido para um link ij (congestionamento). |
| $\lambda^{s,d}$ | Tráfego total de uma fonte s e destino d . |
| $\lambda_{i,j,q}$ | Tráfego no q-ésimo caminho óptico i - j . |
| $\lambda_{i,j,q}^{s,d}$ | Tráfego da fonte s e destino d que passa pelo q-ésimo caminho óptico i - j . |
| Δ | Número de portos dos roteadores |
| $W_{s,d,w}^{i,j,f}$ | Caminho óptico de origem s e destino d que passa pelo enlace (i,j) , utilizando a fibra f e o comprimento de onda w . |
| $W_{s,d}$ | Caminho óptico entre o nó origem s e destino d . |
| $W_{s,d,w}$ | Caminho óptico entre o nó origem s e destino d que utiliza comprimento de onda w . |
| λ | Comprimento de onda. |

LISTA DE ACRÔNIMOS

| | |
|---------------|--|
| ASE | Emissão Espontânea Amplificada (Amplified spontaneous emission) |
| ATM | Asynchronous transfer mode |
| DSF | Fibra de dispersão deslocada (Dispersion-shifted fiber) |
| DWDM | Dense wavelength division multiplexing |
| EDFA | Amplificador a Fibra Dopada com Érbio (Erbium doped fiber amplifier) |
| FEC | Forward Error Correction |
| FEC | Classe de Equivalência de Encaminhamento |
| FWM | Mistura de quatro-ondas (Four-wave mixing) |
| ILP | Programação Linear Inteira (Integer linear programming) |
| IP | Internet protocol |
| LEAF | Large effective area fiber |
| LTD | Projeto de Topologia de Caminhos Ópticos (Lightpath topology design) |
| MILP | Programação Linear Inteira Mista (Mixed integer linear programming) |
| MPLS | Multiprotocol label switching |
| NZ-DSF | Fibra de dispersão deslocada não-zero (Nonzero-dispersion-shifted fiber) |
| OADM | Optical add/drop multiplexer |
| OLT | Optical line terminal |
| OSNR | Optical signal to noise ratio |
| OXC | Optical crossconnect |
| PMD | Polarization-mode dispersion |
| RWA | Routing and wavelength assignment |
| SBS | Espalhamento Estimulado de Brillouin |
| SDH | Hierarquia Digital Síncrona (Synchronous digital hierarchy) |
| SMF | Fibra monomodo (Single-mode fiber) |
| SOA | Semiconductor optical amplifier |
| SONET | Rede Óptica Síncrona (Synchronous optical network) |
| SPM | Auto-modulação de fase (Self-phase modulation) |
| SRS | Espalhamento Estimulado de Raman |
| XPM | Modulação Cruzada de Fase (Cross-phase modulation) |

CAPÍTULO 1 – Introdução

A utilização das fibras ópticas no início dos anos 80, desencadeou uma revolução nas telecomunicações que resultou numa enorme economia de custos e aumento na qualidade da rede de comunicação, alavancando cada vez mais investimentos em pesquisa e desenvolvimento em busca de novos avanços tecnológicos que possibilitam a utilização da rede óptica.

O presente estado da arte ainda contempla principalmente um modelo, que teve origens em enlaces ponto-a-ponto assíncronos (tecnologia PDH - *Plesiochronous Digital Hierarchy*), progredindo para redes síncronas principalmente em anel (tecnologia SDH/SONET - *Synchronous Digital Hierarchy/Synchronous Optical Network*), porém funcionando como um conjunto de enlaces ponto-a-ponto onde em cada nó há regeneração e (de)multiplexação de circuitos SDH/PDH de tal forma que é mais correto falar em malha óptica ao invés de rede óptica. Somente agora os benefícios da utilização de redes ópticas estão começando a serem aproveitados.

As primeiras redes digitais eram assíncronas, onde cada elemento da rede possuía um relógio interno que gerenciava o seu sinal transmitido, o que poderia gerar além de uma possível diferença de taxas entre diferentes dispositivos, erros nos bits dos sinais recebidos.

Um grande problema no emprego das fibras ópticas era a falta de padrões nos elementos de rede, onde havia várias soluções proprietárias com diferentes formatação nos sinais ópticos, impossibilitando a interconexão de equipamentos de diferentes fornecedores.

A necessidade de um padrão levou à criação de uma rede óptica síncrona (SONET nos EUA, e SDH na Europa e Japão). O SONET/SDH padronizou taxa de linhas, codificação, hierarquia de taxa de bits e funções de operação e manutenção. O SONET/SDH também definiu os tipos de elementos de redes, arquiteturas que fornecedores poderiam implementar, e a funcionalidade que cada nó deveria prover. Os provedores de rede poderiam a partir daí usar equipamentos ópticos de diferentes fornecedores com a confiança de pelo menos possuir interoperabilidade básica.

Talvez o aspecto chave que permitiu o padrão SONET/SDH se manter como padrão num período de tantos avanços e mudanças na capacidade da rede, tenha sido a escalabilidade. Teoricamente, não existe limite superior para taxas de bits SONET/SDH.

Porém, limitações físicas no laser e na fibra óptica começam a impossibilitar novas taxas de bits.

Devido à crescente demanda de usuários por mais serviços, opções e banda, de diferentes tipos de tráfego de dados, um novo padrão é necessário para prover todas as necessidades de recursos. As redes ópticas provêm a largura de banda necessária e flexibilidade para possibilitar os mais diversos serviços fim-a-fim, para todos os clientes, tanto de redes de longa distância e metropolitanas, quanto de redes de acesso, como mostra a Fig. 1.1.

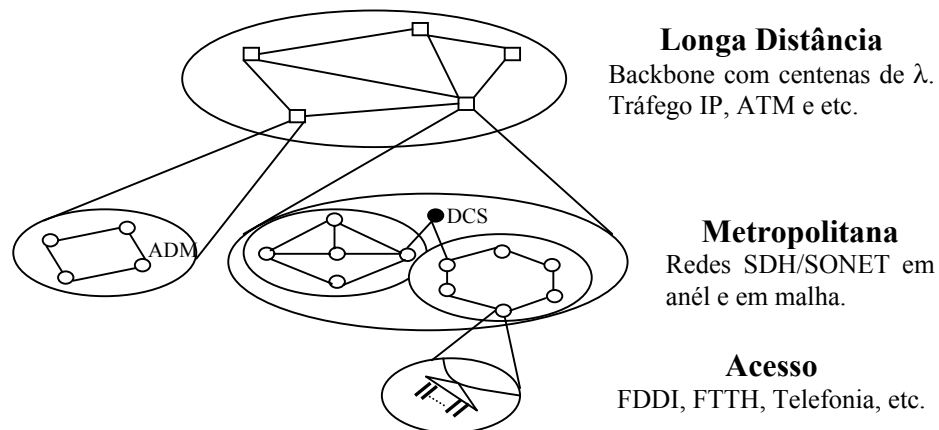


Fig. 1.1- Aplicações da Tecnologia de Rede Óptica. Redes de acesso estão conectadas a nós de uma rede metropolitana, que por sua vez estão interligadas a nós de uma rede de longa-distância.

As funcionalidades de redes na camada óptica começaram com a multiplexação por divisão de comprimentos de onda (WDM), o que permitiu capacidade extra nas fibras existentes. Da mesma forma que o SONET/SDH, elementos de rede e arquiteturas definidas provêm a base das redes ópticas. Porém, diferente do SONET/SDH, ao invés de usar taxa de bits e estrutura de quadros como características básicas, as redes ópticas são baseadas em comprimentos de onda. Os componentes da rede óptica são definidos de acordo como os comprimentos de onda são transmitidos, feito *grooming* ou implementados na rede.

As redes são divididas em camadas, e a criação das redes ópticas veio junto com a definição da camada óptica. Basicamente, as funções da camada óptica são similares às da camada SONET/SDH, porém operando totalmente no domínio óptico. A rede óptica permite trafegar variados tipos de tráfego, inclusive não SONET/SDH, pois a camada óptica é transparente para as camadas superiores, podendo permitir restauração, monitoramento de performance e provisionamento de comprimentos de onda individuais.

É amplamente aceito que redes ópticas de longa distância transparentes (totalmente ópticas) não são factíveis. Uma visão mais realista é a interconexão de domínios (ilhas) de transparência via um núcleo opaco. Este modelo híbrido recebeu o nome de redes translúcidas [19][28]. Nas redes translúcidas é possível que um nó aja tanto como um nó opaco quanto transparente ao mesmo tempo, mas para caminhos ópticos diferentes.

1.1 Escopo da Dissertação

No capítulo 2 faz-se uma introdução aos componentes das redes ópticas como lasers, fotodetectores, e fibras ópticas, assim como as principais tecnologias utilizadas como DWDM (multiplexação densa por divisão de comprimentos de onda) e tipos de amplificação óptica, procurando apresentar valores usuais dos principais parâmetros e as restrições da camada da física.

No capítulo 3 busca-se apresentar as principais redes clientes da camada óptica, assim como variações de arquitetura das redes ópticas mostrando a interação entre as diversas redes clientes com a rede servidora, e apresentando também alguns avanços nesta área.

No capítulo 4 são apresentados métodos para projetar redes translúcidas de longa distância. Onde parte-se de uma abordagem mais clássica, que é a mesma de quando se projeta uma rede de roteamento de comprimentos de onda usual, resolvendo primeiramente o problema de projeto da topologia caminhos ópticos (LTD), para depois resolver o problema de roteamento e alocação de comprimentos de onda (RWA). Um segundo método, é uma variação do primeiro, pois parte-se de uma matriz de tráfego de caminhos ópticos, logo o LTD já está resolvido, faltando apenas solucionar o RWA. O terceiro método, é mais atual, pois considera a distribuição das redes em nós hubs e ilhas de transparência.

No 5º e último capítulo faz-se uma análise geral dos resultados e aponta-se alguns estudos futuros.

CAPÍTULO 2 – Componentes e Tecnologias

As redes ópticas só são possíveis devido às avançadas tecnologias que permitem que funções necessárias de uma rede de comunicação sejam realizadas no domínio óptico. Tecnologias ópticas estão continuamente progredindo a fim de permitir um aumento de performance e capacidade de gerência e controle das redes ópticas. Dispositivos e tecnologias essenciais como EDFA (amplificadores a fibra dopada com érbio), DWDM (multiplexação densa por divisão de comprimento de onda) e OXC (*optical crossconnect*) só foram desenvolvidos alguns anos atrás e continuam a serem aperfeiçoados.

Neste capítulo serão apresentadas as principais restrições, componentes e tecnologias usados para implementar uma rede óptica. O objetivo é mostrar o funcionamento e características destes componentes básicos junto com a noção de performance apresentado por eles considerando limitações da camada física. São estes componentes que possibilitarão a rede óptica nova geração.

2.1 Fibras Ópticas

Uma fibra óptica consiste de um núcleo cilíndrico rodeado por uma casca como mostrado na Fig. 2.1. Tanto o núcleo como a casca são produzidas basicamente por sílica (SiO_2), cujo índice de refração é aproximadamente 1,5. Durante a fabricação de uma fibra, elementos dopantes (impurezas) são inseridos no núcleo e/ou na casca de tal maneira a deixar o índice de refração do núcleo um pouco maior do que na casca, o que é imprescindível para possibilitar o guiamento de luz pelo núcleo.

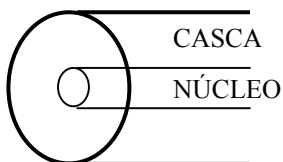


Fig. 2.1 – Núcleo e casca de uma fibra óptica

As fibras ópticas possuem várias características que as fazem um excelente meio físico para redes de alta velocidade, especialmente nas bandas de 1,3 e 1,55 μm (2ª e 3ª janelas respectivamente), que são as bandas mais utilizadas atualmente para comunicações ópticas. A largura de banda útil nestas janelas, é definida como aquela no qual a perda em

decibéis por quilômetro não é maior do que o dobro da mínima atenuação da banda (largura de banda de 3 dB), e tem aproximadamente 35 THz [1].

2.1.1 Propagação da Luz nas Fibras Ópticas

Para explicar a propagação da luz nas fibras ópticas, pode-se utilizar a abordagem da óptica geométrica, na qual é válida somente para fibras multimodo (vários raios de luz, ou modos, se propagam pela fibra), ou a abordagem da teoria das ondas eletromagnéticas.

A primeira abordagem está baseada na lei de Snell, onde a propagação da luz se dá devido uma série reflexões internas totais que ocorrem na interface núcleo-casca. A segunda abordagem está baseada nas equações de Maxwell, onde fazendo-se algumas considerações chega-se à equação de onda de Helmholtz; cada par de solução desta equação para os vetores campo elétrico e campo magnético, que satisfazem a equação de onda e as condições de contorno entre núcleo-casca, representam um modo da fibra.

Uma característica muito importante e que é facilmente mostrada com auxílio da óptica geométrica é o ângulo de aceitação α (ou ângulo crítico), onde luz entrando na fibra acima deste ângulo é perdido e a luz entrando neste ângulo ou abaixo propaga pelo material como mostra a Fig. 2.2.

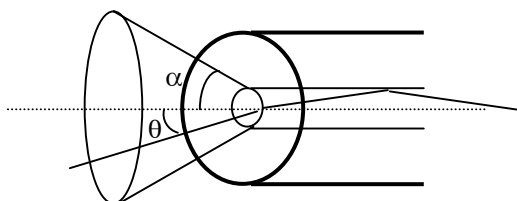


Fig. 2.2 – Luz entrando com um ângulo menor ou igual ao ângulo de abertura do cone, $\theta \leq \alpha$ (ângulo de aceitação), propaga pela fibra.

Um dos resultados mais importante que a teoria das ondas mostra é a condição de corte para a propagação de um único modo na fibra, que é dado por:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2,405$$

onde: V é conhecido como parâmetro V ; a é o raio do núcleo; n_1 e n_2 são os índices de refração do núcleo e da casca respectivamente e λ é o comprimento de onda do único modo. O menor λ para o qual uma determinada fibra é monomodo é chamada de comprimento de onda de corte λ_{corte} .

Obs.: O valor de $\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ é conhecido como abertura numérica (AN), e o seu arcosseno é o ângulo de aceitação, sendo que está-se considerando que entre o LASER ou LED e a fibra, tem-se o ar ($n = 1$).

2.1.2 Tipos de Fibras Ópticas

As primeiras fibras eram chamadas de fibras multimodo por permitir a propagação de vários modos. O diâmetro do núcleo destas fibras variava entre 50 a 85 μm , o que permite utilizar a óptica geométrica para entender mais facilmente a propagação da luz nestas fibras, já que o comprimento de onda do sinal de luz é muito menor do que este valor. Estas fibras eram de índice degrau (*step-index*).

Uma evolução das fibras multimodos de índice degrau é a fibra de índice gradual (GRIN – *graded-index fiber*), onde ao invés de ter uma variação no índice de refração podendo ser representada por uma função degrau na interface casca-núcleo, tem-se uma variação gradual entre um máximo no centro da núcleo até um mínimo na interface casca-núcleo.

As fibras monomodo começaram a ser utilizadas em meados da década de 80, onde a grande vantagem sobre as fibras multimodo era a eliminação da dispersão intermodal (explicado no próximo item). As fibras monomodo tem um núcleo com diâmetro em torno de 8 a 10 μm .

Há diversos tipos de fibras monomodo, que diferem entre si no perfil de dispersão cromática e nas conseqüências dos efeitos não-lineares.

Fibra Monomodo Padrão (SMF – Single-Mode Fiber) – É o tipo de fibra mais utilizada. Este tipo de fibra é projetada para ter dispersão cromática zero em 1310 nm e em torno de 17 ps/nm.km em 1,55 μm .

Fibra de Dispersão Deslocada (DSF – Dispersion-shifted fiber) – Foi desenvolvida com o objetivo de minimizar a dispersão cromática em 1,55 μm . Apesar da grande vantagem de possuir atenuação e dispersão mínima, esta fibra é imprópria para ser utilizada em sistemas WDM (para poucos λ e com um bom espaçamento espectral entre os sinais, pode-se utilizar esta fibra) devido a fortes penalidades relacionadas aos efeitos não-lineares, principalmente mistura de quatro ondas.

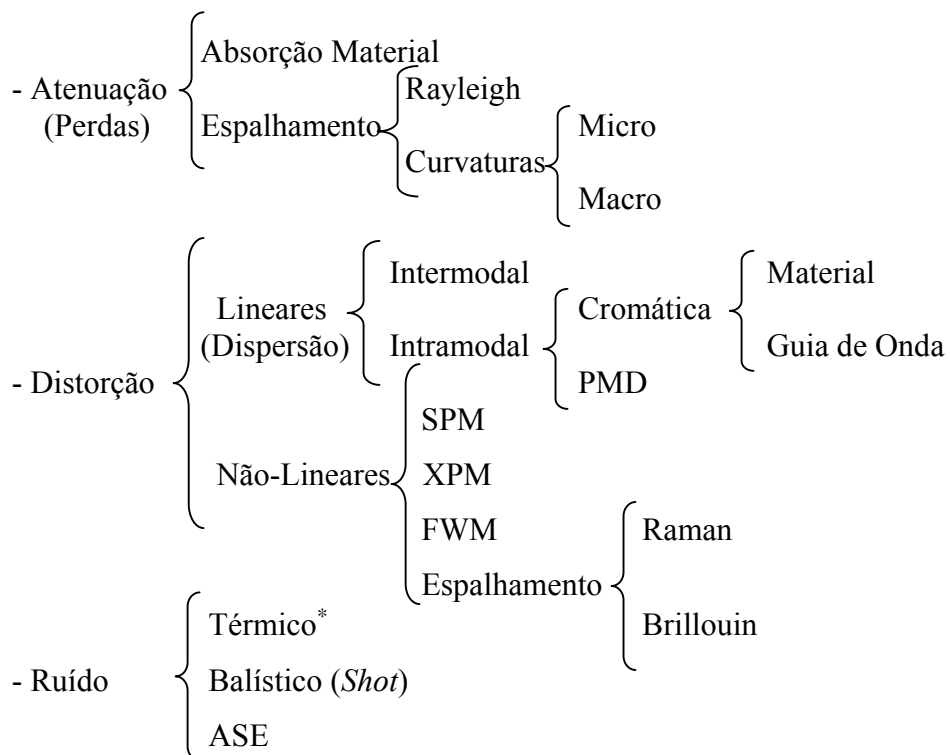
Fibra de Dispersão Equalizada ou Aplainada (*Dispersion-flattened fibers*) – O perfil de dispersão é próximo de zero por uma faixa espectral muito larga.

Fibra de Dispersão Deslocada Não-Zero (*NZ-DSF – Nonzero Dispersion Shifted Fiber*) – Os efeitos não-lineares são reduzidos devido a baixa dispersão cromática presente na fibra. Tais fibras possuem dispersão cromática entre 1 e 6 ps/nm.km ou -1 e -6 ps/nm.km na janela de 1,55 μm [2].

Fibras de Grande Área Efetiva (*LEAF – Large Effective Area Fiber*) – Os efeitos não-lineares podem ser reduzidos produzindo uma fibra com uma grande área efetiva. Estas fibras são fibras NZ-DSF com área efetiva acima de 70 μm^2 . Por isso estas fibras possuem um melhor compromisso entre dispersão cromática e não-linearidades do que NZ-DSF normais, porém com desvantagem de uma inclinação de dispersão (*S – dispersion slope*) em torno de 0,11 ps/nm².km comparado com 0,07 ps/nm².km de outras NZ-DSF e 0,05 ps/nm².km para fibras de inclinação reduzida [2].

2.2 Restrições da Camada Física

Vários fenômenos físicos são responsáveis pela degradação de sinais na fibra óptica. Basicamente, pode-se dividir os mecanismos de degradação em duas categorias, a atenuação e a distorção (apesar de que alguns fenômenos não-lineares podem implicar em atenuação de alguns sinais em detrimento de outros). Os parâmetros mais comumente utilizados para indicar degradações são o *coeficiente de atenuação* α da fibra (em dB/km), relativo à atenuação, as distorções lineares relativo à *dispersão cromática* (em ps/nm.km) e *PMD* (em ps/km^{1/2}), além dos efeitos não-lineares que normalmente são calculados como penalidades no balanço de potência e que podem ser fatores limitantes principalmente em sistemas WDM. Pode-se considerar que os efeitos lineares são aqueles independentes da potência acoplada na fibra, enquanto os efeitos não-lineares são dependentes da potência e do comprimento de onda, pois na realidade o índice de refração da fibra é dependente da potência do sinal e de sua frequência, e sinais dentro da fibra podem interagir entre si, fenômenos estes que passam praticamente despercebidos para uma pequena potência, onde a fibra se comporta como um meio linear. No diagrama abaixo, vê-se os mecanismos de degradação nos sistemas de comunicações ópticas.



2.2.1 Atenuação

Considerando que P é a potência acoplada na fibra em sua entrada, sua potência de saída é dada por:

$$P_{OUT} = 10^{-\frac{\alpha L}{10}} P_{IN}$$

onde α é o coeficiente de atenuação em dB/km que inclui além da absorção material, as perdas por espalhamento que independem da potência.

2.2.1.1 Absorção Material

As fibras ópticas são fabricadas com sílica fundida (SiO_2). A absorção material pode ser subdividida em absorção material intrínseca e extrínseca, onde a primeira corresponde às perdas causadas pela sílica pura, e a última está relacionada com as perdas devido às impurezas.

A absorção material intrínseca é devido à ressonância eletrônica das moléculas de sílica que ocorre na região ultravioleta ($\lambda < 0,4 \mu\text{m}$) e ressonância vibracional que ocorre na

* O ruído térmico é gerado no circuito do receptor e não na fibra óptica

região infravermelha ($\lambda > 0,7 \mu\text{m}$). Devido à natureza amorfa da sílica fundida, essas ressonâncias estão na forma de bandas de absorção cujas caudas se estendem para região visível [3].

A absorção material extrínseca é devido à presença de impurezas tais como os metais de transição Fe, Cu, Co, Ni, Mn e Cr e principalmente a íons de OH. Os picos de absorção que ocorrem na zona de interesse para as comunicações ópticas são devidos à ressonância vibracional dos vapores de água que ocorre em $2,73 \mu\text{m}$, porém possui harmônicas nos comprimentos de onda $1,39 \mu\text{m}$, $1,24 \mu\text{m}$ e $0,95 \mu\text{m}$ [3].

2.2.1.2 Espalhamento

Várias características das fibras ópticas fazem com que os sinais sofram espalhamento. O espalhamento de Rayleigh é um mecanismo de perda cuja origem são flutuações locais de densidade das moléculas de sílica. As perdas decorrentes do espalhamento de Rayleigh são proporcionais a λ^{-4} e representam uma componente dominante na atenuação do sinal para pequenos comprimentos de onda em fibras em geral, assim como nas fibras mais modernas, que atualmente possuem proporções minimizadas de íons de OH.

Curvaturas na fibra constituem uma outra fonte de perdas por espalhamento. A perda por macro-curvatura é devida ao fato de que parte da energia do sinal é espalhada na casca durante uma curva na fibra. A perda por macro-curvatura é insignificante na prática.

A perda por micro-curvatura está relacionada ao fato da distorção aleatória que ocorre na fibra durante o cabeamento quando a fibra é pressionada contra uma superfície que não seja completamente plana.

2.2.2 Distorção

Enquanto a atenuação está relacionada à diminuição de intensidade do sinal, a distorção está relacionada à mudança do formato deste, desta forma implicando num outro fator limitante do sistema óptico.

2.2.2.1 Dispersão (Distorção Linear)

A dispersão de uma maneira geral é caracterizada pelo alargamento do pulso óptico. Dependendo do tipo da fibra, monomodo ou multimodo terá-se que analisar quais são os componentes limitantes da dispersão.

2.2.2.1.1 Intermodal

Dispersão intermodal só ocorre em fibras multimodo, e é devida à diferença de velocidades de propagação dos vários modos na fibra, sendo dominante em relação à dispersão intramodal. Para diminuir este problema foi desenvolvida a fibra de índice de refração gradual (GRIN – *Graded Index Fiber*).

2.2.2.1.2 Intramodal

Normalmente dispersão intramodal possui o mesmo conceito de dispersão cromática, porém aqui, dispersão intramodal será dividida em cromática e PMD (*Polarization Mode Dispersion*). A primeira refere-se às diferentes velocidades de grupo com que se propagam as componentes espectrais do pulso óptico, enquanto o segundo tem origem no fato de que a equação de onda nas fibras ópticas possui duas soluções linearmente independentes e ortogonais entre si, e estas soluções (modos) têm uma ligeira diferença nas suas constantes de propagação, que podem variar aleatoriamente ao longo do percurso, com isso, as componentes do sinal espalhado chegam em tempos diferentes no receptor, ocasionando em penalidades ao sistema.

2.2.2.1.2.1 Cromática

Dispersão cromática é dada pela soma da dispersão material com a dispersão de guia de onda ($D = D_M + D_{WG}$). A dispersão material ocorre devido ao índice de refração da sílica ser dependente da frequência óptica, enquanto a dispersão de guia de onda é dependente dos parâmetros da fibra como a raio do núcleo e os índices de refração do núcleo e da casca.

Um dado comprimento de onda sujeito a uma dispersão positiva, verá suas componentes mais longas viajarem mais lentamente do que suas componentes mais curtas, enquanto um comprimento de onda sujeito a dispersão negativa, verá suas componentes mais longas viajarem mais rapidamente do que suas componentes mais curtas.

A penalidade imposta por dispersão cromática pode ser calculada assumindo que o alargamento do pulso não alcança uma fração ϵ do período do bit. Para uma penalidade de 1 dB, $\epsilon = 0,306$ e para uma penalidade de 2 dB, $\epsilon = 0,491$. Considerando que D seja a dispersão cromática num dado comprimento de onda, B a taxa de bits, $\Delta\lambda$ a largura espectral da fonte e L comprimento do enlace, esta limitação pode ser expressa por [2]:

Para Fontes com Largura Espectral Larga:

$$|D| L B (\Delta\lambda) < \epsilon$$

Para Fontes com Largura Espectral Estreita:

$$B \lambda \sqrt{\frac{|D| L}{2\pi c}} < \epsilon$$

Caso a fonte seja modulada diretamente, a largura espectral do sinal transmitido, ainda poderá alargar mais, devido ao *chirp*, o que não ocorre caso utilize-se modulação externa. Dependendo do caso, o *chirp*, pode ser usado em prol do sistema, pois caso o valor do *chirp* possua o mesmo sinal do valor da dispersão cromática, o pulso primeiro se estreita para depois se alargar.

Dependendo do parâmetro D das fibras, compensação de dispersão pode vir a ser desnecessária para taxas de até 2,5 Gbps por canal devido à largura do bit ser bem maior do que a distorção do sinal. Esses enlaces são limitados principalmente por perdas e ruído, significando que o alcance máximo do enlace é limitado por ruído dos amplificadores.

Canais de 10 Gbps são limitados principalmente por distorção, ao invés de atenuação e ruído, por isso compensação de dispersão é normalmente utilizada. Além da dispersão cromática, a PMD passa a ser um fator limitante também.

2.2.2.1.2.2 PMD (*Polarization Mode Dispersion*)

Como já explicado, a dispersão do pulso óptico é resultado das diferentes velocidades de propagação dos dois modos de polarização ao longo do enlace. O atraso de propagação entre os dois modos, que se acumula sobre todo o enlace óptico é chamado de atraso diferencial de grupo (DGD – *differential group delay*) e é medido em picossegundos (ps). PMD é um fenômeno estatístico e o DGD produzido por PMD varia aleatoriamente no tempo. Por isso, para caracterizar a PMD, o valor médio de DGD é usado. Como regra

geral, o valor médio DGD aumenta com a raiz quadrada do comprimento do enlace, como é mostrado na fórmula abaixo.

$$\Delta\tau = D_{\text{PMD}} \times L^{1/2}$$

2.2.2.2 Distorções Não-Lineares

Os efeitos não-lineares podem ser divididos em duas categorias: a primeira categoria é relativa à variação do índice de refração da fibra em função da potência óptica e a segunda categoria é relativa aos processos de espalhamento não-lineares. Na primeira categoria enquadram-se os efeitos de auto-modulação de fase (SPM – *Self-Phase Modulation*), modulação cruzada de fase (XPM – *Cross-Phase Modulation*) e mistura de quatro-ondas (FWM – *Four-Wave Mixing*), enquanto na outra categoria se situam os efeitos de espalhamento de Raman (SRS – *Stimulated Raman Scattering*) e o espalhamento de Brillouin (SBS – *Stimulated Brillouin Scattering*). É interessante saber que, nem sempre não-linearidades implicam em penalidades, como exemplo tem-se os amplificadores de Raman.

A interação não-linear depende do comprimento da transmissão, e da área de seção transversal da fibra. Quanto maior o comprimento do enlace, maior é a interação e pior o efeito da não-linearidade. Porém, enquanto o sinal propaga através do enlace, sua potência diminui devido à atenuação da fibra. Por isso, a não-linearidade é modelada considerando que o seu efeito tende a desaparecer com o progresso da onda pela fibra. Isto resulta num comprimento efetivo sobre o qual a não-linearidade da fibra influencia a onda. Para uma fibra com o coeficiente de atenuação α (em néper/km), este comprimento de interação efetivo é definido por: $L_{\text{eff}} = (1 - e^{-\alpha L}) / \alpha$. Onde L é o comprimento real do enlace. Para fibras longas tem-se $L_{\text{eff}} \approx 1 / \alpha$, que fornece $L_{\text{eff}} \approx 20$ km na 3ª janela [4].

Para uma dada potência óptica, sua intensidade é inversamente proporcional à área de seção transversal do núcleo da fibra. Dado que a potência não é distribuída uniformemente na seção transversal da fibra, por conveniência usa-se área de seção transversal efetiva A_{eff} . Como regra geral, fibra padrão monomodo possui área efetiva de $80 \mu\text{m}^2$, fibra de dispersão deslocada possui A_{eff} de $55 \mu\text{m}^2$, e fibra de compensação de dispersão possuem A_{eff} da ordem de $20 \mu\text{m}^2$ [5]. Recentemente, uma NZ-DSF com uma

área efetiva grande (mais do que $70 \mu\text{m}^2$) foi desenvolvida tanto pela Corning como pela Lucent [1].

2.2.2.2.1 SPM/XPM (*Self-Phase Modulation / Cross-Phase Modulation*)

Estes dois efeitos, da mesma forma que a dispersão, alteram o formato do pulso. A penalidade resultante deste dois efeitos depende fortemente da potência por canal, da dispersão na fibra e do comprimento do enlace óptico.

SPM ocorre devido ao índice de refração da fibra depender da potência por canal. Esta mudança no índice de refração resultará em deslocamentos de fase que são proporcionais a intensidade do pulso. Devido ao pulso não possuir uma intensidade constante durante toda sua duração, diferentes partes do pulso, sofrerão diferentes deslocamentos de fase. Para taxas de transmissão de 10 Gb/s, a potência do sinal está usualmente limitada abaixo de 5 dBm por canal [1].

Em sistemas WDM, a não-linearidade do índice de refração gera XPM, que converte flutuações de potência em um determinado canal de comprimento de onda em flutuações de fase em outros canais co-propagantes. Isto pode ser extremamente atenuado em sistemas WDM operando sobre fibra padrão, mas pode ser um grande problema em enlaces WDM operando em 10 Gbps e mais ainda sobre fibras de dispersão deslocada. Quando combinada com a dispersão das fibras, o alargamento espectral devido SPM e XPM pode ser um fator limitante em enlaces de distâncias muito longas, tais como sistemas que cruzam o país inteiro ou submarino [5]. Em sistemas submarinos, normalmente usa-se dispersão cromática negativa, pois a interação entre dispersão cromática positiva e SPM, para altos níveis de potência, geram *instabilidade modulacional* (MI). MI ocasiona o particionamento de um pulso relativamente largo (digamos 100 ps, que corresponde aproximadamente a uma transmissão de 10 Gbps) em um fluxo contínuo de pulsos estreitos (de duração de poucos picossegundos), que leva a um aumento significativo na probabilidade de erro de bit [1].

2.2.2.2.2 FWM (*Four Wave Mixing*)

FWM é um outro efeito não-linear onde a potência óptica em alguns comprimentos de onda são transferidos para outros comprimentos. Devido às propriedades físicas da fibra (neste caso, polarização induzida não-linear), os canais WDM nas frequências f_1, \dots, f_n ,

interagem entre si para criar novos comprimentos de onda em frequências tais como: $2 f_i - f_j$ e $f_i + f_j - f_k$. A penalidade resultante deste efeito é independente da taxa de bits e depende fortemente do espaçamento entre os canais WDM e da dispersão da fibra, quanto mais próximo de zero é a dispersão, mas severo o efeito da FWM no sistema.

Os sinais gerados com frequências $f_i + f_j - f_k$, para $i \neq k$, e $j \neq k$, são os mais problemáticos, podendo gerar um intenso *crosstalk* no enlace óptico. As penalidades não são devidas apenas ao *crosstalk* mas também a perda de potência nos canais ópticos WDM.

2.2.2.2.3 Espalhamento de Raman e de Brillouin

SBS e SRS são dois efeitos não-lineares de espalhamento que transferem energia de um comprimento de onda menor para outro comprimento de onda maior. Os pulsos de canais ópticos de um comprimento de onda menor vêm sua energia sendo transferida para comprimentos de onda maiores enquanto propagam através da fibra. Ambos os efeitos SBS e SRS se tornam mais importantes com o aumento de potência nos canais WDM e aumento do comprimento dos enlaces ópticos.

No caso de SBS, a transferência de energia ocorre numa largura de linha estreita (em torno de 20 MHz em 1550 nm). Como os enlaces WDM atualmente, possuem um espaçamento de 100 ou 200 GHz entre os comprimentos de onda, não ocorre interação entre diferentes canais WDM. Por isso o efeito do SBS está confinado dentro de cada canal num sistema WDM. O efeito da SBS se propaga na direção oposta ao da transmissão.

SRS é um efeito de faixa larga que acopla energia tanto na direção de transmissão quanto na direção inversa. O acoplamento ocorrerá entre dois canais somente quando ambos estiverem enviando bits 1 (isto é, a potência está presente em ambos canais). O limiar do SRS é bem maior do que do SBS

2.2.3 Ruído

O sinal de tensão ou corrente no qual o circuito de decisão determina se foi transmitido o sinal 1 ou o sinal 0 é corrompido principalmente por 3 tipos de ruído: o ruído térmico, o ruído balístico e o ruído ASE (caso se tenha um amplificador óptico no enlace).

O ruído térmico é um processo de ruído branco produzido no receptor. Sua potência é proporcional à largura de faixa elétrica do receptor B_e (e a temperatura), que varia entre $0,5 R_b$ e $1 R_b$, onde R_b é a taxa de bits.

O ruído balístico, mais conhecido como ruído *shot*, é devido à natureza não determinística da fotocorrente, onde a chegada dos fótons é modelada como um processo aleatório de Poisson. Com isso a fotocorrente é considerada como sendo vários impulsos de cargas elétricas, gerados toda vez que um fóton chega no fotodetector. Com isso tem-se uma corrente média (constante), somada com uma corrente cuja distribuição estatística é gaussiana (devido o processo de soma de elétrons) que representa a corrente devido o ruído *shot*.

O ruído ASE (*Amplified Spontaneous Noise*) é devido à emissão espontânea que ocorre nos amplificadores ópticos, logo num sistema não-amplificado não se tem este tipo de ruído. O amplificador óptico provê ganho ao sinal de entrada, porém em contrapartida apresenta emissão espontânea que significa ruído adicionado no sinal de saída já amplificado.

No fotodetector é produzida uma corrente que é proporcional à potência óptica. A potência óptica é proporcional ao quadrado do campo elétrico. Por isso existe o batimento sinal-ASE e o batimento ASE-ASE, além é claro do ruído térmico e do ruído *shot* [1].

Caso se tenha um sistema não amplificado, com um fotodetector *pin*, o ruído dominante é o ruído térmico. Caso o fotodetector seja um APD, o ruído *shot* é amplificado podendo ultrapassar o ruído térmico.

Caso se tenha um sistema amplificado (mesmo que seja só com o pré-amplificador), normalmente o ruído ASE é dominante. Caso a largura de faixa óptica B_o seja suficientemente reduzida ($B_{oMÍN} = 2 B_e$), o sinal de batimento ASE-ASE se torna insignificante comparado com o sinal de batimento sinal-ASE que é dominante.

2.3 Sóliton

O sóliton é um tipo particular de pulso óptico, com duração curta e potência espectral de alto pico, o alargamento espectral devido aos efeitos não-lineares, especificamente SPM, e a dispersão cromática da fibra se compensam.

Os sólitons são muito importantes para a comunicação óptica já que eles são um meio de superar completamente o problema da dispersão cromática. Por isso, os sólitons possibilitam a propagação da luz através de uma grande distância sem mudar a forma do pulso. Utilizando os sólitons em conjunto com os amplificadores ópticos, que compensam a atenuação, é possível conseguir uma alta taxa de transmissão sem a necessidade de

regeneradores através de uma distância extremamente longa. Já foi demonstrado em laboratório que tal combinação pode permitir transmissão sem regeneração de 20 Gbps através de uma distância de 7.150 km, que totaliza um produto BL de 143 Tbps.Km [6].

2.4 Lasers

Os lasers (*light amplification by stimulated emission of radiation*) utilizados em comunicações ópticas, são dispositivos semicondutores que convertem energia elétrica em luz basicamente coerente. Assim como qualquer oscilador seu princípio de operação é do ganho mais realimentação positiva.

Os lasers semicondutores mais utilizados são os lasers Fabry-Perot, que possuem vários modos longitudinais e largura espectral de alguns nanômetros, e os lasers DBR (*Distributed Bragg reflector*) e DFB (*Distributed-Feedback Lasers*) que possuem um único modo longitudinal e podem ter largura espectral de algumas dezenas de megahertz ou até menos.

Os principais parâmetros relacionados ao transmissor são sua potência de saída, tempo de subida/descida, taxa de extinção, tipo de modulação, razão de supressão de modos laterais, ruído de intensidade relativo, estabilidade de comprimento de onda e precisão[1].

A potência de saída depende do tipo de transmissor. Lasers DFB emitem uma potência de 1 mW até 10 mW. Um amplificador óptico de potência pode aumentar esta potência, normalmente até 50 mW. Os limites superiores de potência são restringidos por não-linearidades e segurança física[1].

A principal penalidade ao sistema devido ao transmissor, é a taxa de extinção que é definida como a razão entre a potência transmitida quando se envia um bit 1, P_1 , e a potência transmitida quando se envia um bit 0, P_0 . Na prática, transmissores possuem taxa de extinção entre 10 e 20.

Os componentes das redes ópticas necessitam de fontes ópticas coerentes, estáveis e de largura espectral estreitas, para poderem funcionar devidamente [7]. Além do mais, nestas redes WDM, é necessário utilizar lasers sintonizáveis, nos quais os comprimentos de onda são ajustáveis conforme necessário.

2.5 Fotodetectores

O sinal de luz transmitido pela fibra, quando chega ao destino é opcionalmente amplificado opticamente, para depois ser fotodetectado e finalmente amplificado eletricamente antes de alcançar o circuito de decisão. O fotodetector que converte o sinal óptico em sinal elétrico é o principal elemento de todo este processo.

Os diferentes tipos de receptores ópticos variam principalmente em um ou mais de 4 parâmetros principais: Primeiro, eficiência do detector (responsividade), no qual é uma medida da razão entre intensidade da corrente de saída e a potência óptica de entrada. Segundo, a faixa de comprimentos de ondas sobre o qual o receptor operará. Terceiro, o tempo de resposta, no qual é uma medida de quão rapidamente o receptor pode reagir a mudanças na potência óptica de entrada. Quarto, o nível de ruído do próprio receptor, no qual deve ser considerado como um limite inferior da faixa de operação do dispositivo [8].

Normalmente os fotodetectores trabalham sobre uma faixa larga de frequências, o que possibilita responder a um grande conjunto de comprimentos de onda. Os principais tipos de receptores são os diodos PIN (semicondutor tipo P e do tipo N, dopado com um material intrínseco no meio) e os APD (*Avalanche Photodiodes*). Devido a região de multiplicação, pode-se ter um ganho de sensibilidade de mais de 10 dB utilizando o APD, porém o ruído balístico é amplificado também podendo tornar-se dominante sobre o ruído térmico.

Os parâmetros chaves de sistema associados ao fotodetector são sua sensibilidade e sobrecarga (*overload*). A sensibilidade é a potência óptica média necessária para atingir uma certa taxa de erro de bit (BER). O parâmetro de sobrecarga é a máxima potência de entrada que o fotodetector pode receber. Valores típicos de sensibilidade e sobrecarga estão listados na Tab. 2.1.

| Taxa de Bits | Tipo | Sensibilidade | Sobrecarga |
|--------------|--------|---------------|------------|
| 622 Mb/s | pinFET | -32 dBm | -7 dBm |
| 2,5 Gb/s | pinFET | -23 dBm | -3 dBm |
| 2,5 Gb/s | APD | -34 dBm | -8 dBm |
| 10 Gb/s | pinFET | -18 dBm | -1 dBm |
| 10 Gb/s | APD | -24 dBm | -6 dBm |

Tab. 2.1 – Valores típicos de sensibilidade e sobrecarga para diferentes tipos de fotodetectores.

2.6 (D)WDM

Para suplantar as limitações dos sistemas de único comprimento de onda e progredir para sistemas modernos de multiplexação (densa) de comprimentos de onda, especialmente para enlaces de longa distância, quatro componentes-chaves são importantes: Primeiro, fibras com dispersão não-zero e com diminuição do pico de água. Segundo, amplificador a fibra dopada com Érbio (EDFA). Terceiro, lasers sintonizáveis. Quarto, filtros ópticos, em especial a grade de Bragg na fibra para isolar comprimentos de onda individuais no receptor [8].

Os primeiros sistemas WDM, utilizavam a multiplexação de apenas dois canais. Eles usavam as regiões de 1310 nm e 1550 nm. Sistemas WDM com espaçamento entre canais em torno de 10 nm na terceira janela também são utilizados, porém o que distingue o WDM denso, é o fato dos canais estarem espaçados no máximo em 1 nm entre si [8]. Na realidade, não existe um consenso para definição de WDM denso, pois no mesmo [8], 5 páginas após definir DWDM (espaçamento de até 1 nm), há um item sobre a grade ITU para DWDM, onde é apresentada a proposta *draft* G.692, que permite:

- 4 canais com espaçamento de 3,2 nm (400 GHz)
- 8 canais com espaçamento de 1,6 nm (200 GHz)
- 16 canais com espaçamento de 1,6 nm (200 GHz)
- 32 canais com espaçamento de 0,8 nm (100 GHz)

Logo, está-se considerando um espaçamento de 400 GHz como DWDM também. A proposta G.692 permite também mais do que 32 canais transportando sinais com taxas de 622 Mbps, 2,5 Gbps ou 10 Gbps numa única fibra, usando tanto sistemas unidirecionais ou bidirecionais.

A grade padrão ITU, possui frequência central em 193,1 THz, que é equivalente a 1553,5 nm, e espaçamento entre canais de 50 GHz. Os comprimentos de onda usados estão na faixa entre 1528,77 nm até 1560,61 nm.

Há um trabalho intenso para possibilitar o uso de todo o espectro da fibra. Sistemas WDM utilizando mais de 100 comprimentos de onda com taxas acima de 10 Gbps já foram demonstrados utilizando somente a banda C da fibra [1] (vide Tab. 2.2) e pesquisas para possibilitar a utilização de todo o espectro da fibra estão sendo realizados. Os sistemas

WDM começaram a utilizar a banda C, principalmente porque os amplificadores ópticos dopado com érbio (EDFA) utilizava esta região, porém atualmente, estes amplificadores podem utilizar a banda L também. Outros tipos de amplificadores, como o amplificador de Raman, e novos tipos de fibras estão permitindo a criação de novas janelas ópticas, como mostra a Tab. 2.2.

| Banda | Descrição | Faixa de λ (nm) |
|--------------|------------------|---|
| O | Original | 1260-1360 |
| E | Estendida | 1360-1460 |
| S | Curta | 1460-1530 |
| C | Convencional | 1530-1565 |
| L | Longa | 1565-1625 |
| U | Ultra Longa | 1625-1675 |

Tab. 2.2 – Diferentes bandas (janelas) nas fibras ópticas. As faixas de λ são aproximadas e ainda não foram padronizadas.

2.7 Amplificadores Ópticos

Amplificação totalmente óptica é conhecida também como amplificação 1R (somente regeneração) e é transparente ao formato da modulação da informação. Há a amplificação 2R (regeneração e reformatação) e a 3R (regeneração, reformatação e sincronização), porém são mais caras e menos apropriadas para as futuras redes ópticas. As redes digitais atuais (SDH e SONET) que utilizam a fibra óptica somente como meio de transporte, utilizam principalmente amplificação 3R [9].

Amplificadores ópticos utilizam o princípio da emissão estimulada, assim como os lasers. Os dois tipos básicos de amplificadores ópticos são: EDFA e SOA (*semiconductor optical amplifier*).

As fibras ópticas dopadas com érbio possuem vários metros de comprimento e são inseridos no meio do enlace provendo ganho na região 1530 nm até 1565 nm (largura de banda de 3 dB de aproximadamente 35 nm). Um laser de bombeio excita átomos dopantes, liberando elétrons para camadas de mais alta energia. Isto faz com que o sinal de dados estimulem os átomos excitados liberando fótons, através de emissão estimulada (com isso ocorre a amplificação) e emissão espontânea (gerando ruído). A Fig. 2.3 mostra o esquema de um EDFA.

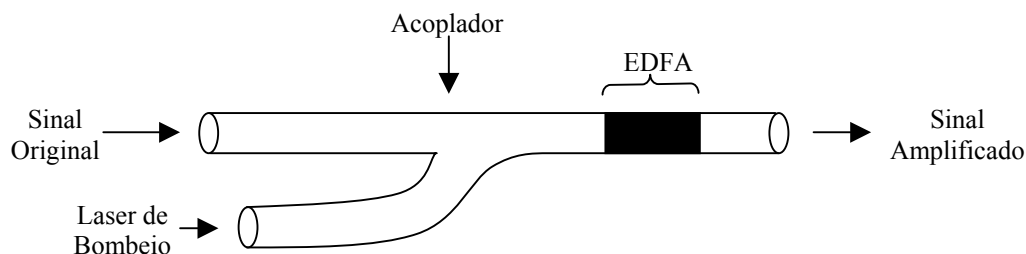


Fig. 2.3 – Amplificador a Fibra Dopada com Érbio

A maioria dos EDFAs são bombeados com lasers no comprimento de onda 980 nm ou 1480 nm. O bombeamento no comprimento de onda 980 nm tem uma eficiência de ganho maior, em torno de 10 dB/mW, enquanto em 1480 nm a eficiência é em torno de 5 dB/mW. Valores típicos de ganho são da ordem de 25 dB, mas experimentalmente se alcançou ganho de até 51 dB [9].

Os amplificadores ópticos são usados em 3 diferentes configurações: pré-amplificador óptico que é colocado à frente do receptor para melhorar a sensibilidade; o amplificador de potência (*booster*) que é usado logo depois do transmissor para aumentar a potência de saída; e amplificador de linha que é usado tipicamente no meio do enlace para compensar suas perdas [1].

Atualmente, está-se utilizando também o amplificador de Raman, que utiliza um laser de bombeio de alta potência para bombear a fibra (sem dopagem) na direção oposta ao sinal. Em sistemas utilizando a banda C e L, as bandas são separadas na entrada do amplificador e EDFAs separados são usados para cada banda.

Os amplificadores ópticos semicondutores (SOA) são anteriores ao EDFA, porém não são tão bons quanto os EDFAs para serem utilizados como amplificadores. Porém, eles são utilizados em outras aplicações como *switches* e conversores de comprimento de onda.

2.8 Conversores de Comprimento de Onda

O conversor de comprimento de onda é um dispositivo que transfere informação de um comprimento de onda para outro. Sua maior utilidade é evitar o bloqueio de comprimentos de ondas em OXC (*optical crossconnects*). Por este motivo, este conversor aumenta a flexibilidade e a capacidade da rede para um determinado conjunto fixo de

comprimentos de onda. Ele facilita também o gerenciamento descentralizado da rede a respeito das rotas dos caminhos ópticos e podem facilitar a comutação de proteção.

Como pode-se ver, a conversão de comprimento de onda é uma função muito útil em sistemas ópticos avançados. As características importantes destes conversores incluem possibilidade de transparência à taxa de bits, mínima degradação devido a taxa de extinção, relação sinal-ruído alta na saída, níveis de potência de entrada moderados (~ 0 dBm), possibilidade de manter o mesmo comprimento de onda na entrada e na saída, possibilidade de grande espaçamento entre os comprimentos de onda de entrada e de saída, *chirp* reduzido, velocidade para estabelecer o comprimento de onda de saída, insensibilidade à polarização do sinal de entrada e implementação simples [10].

Há várias técnicas propostas para a realização de conversão de λ . A solução mais direta é a que usa o conversor eletro-óptico, que consiste de um fotodetector seguido de um laser que retransmite o sinal de entrada num novo comprimento de onda. Conversores completamente ópticos ainda são soluções de laboratórios.

Atualmente, as principais promessas de conversores de λ totalmente ópticos são baseados nas não-linearidades do SOA. Os 3 principais métodos de conversão usando SOA são: XGM – modulação de ganho cruzado, XPM – modulação de fase cruzada e FWM – mistura de quatro-ondas[10].

2.9 Filtros Ópticos

Em sistemas WDM é necessário a manipulação de vários comprimentos de onda. Os filtros ópticos permitem a seleção ou passagem de um ou mais comprimentos de onda específicos de um conjunto de comprimentos de onda de entrada, além de serem componentes essenciais em aplicações como (de)multiplexadores, equalização de ganho e filtragem de ruído em amplificadores.

Parâmetros importantes dos filtros ópticos incluem pequena perda por inserção, insensibilidade a polarização do sinal (PDL - *polarization-dependent loss*), largura de banda estreita, grande supressão de lóbulos laterais, tamanho reduzido e custo. Características adicionais como larga faixa dinâmica, alta velocidade de sintonia e mecanismos simples de controle são desejáveis para filtros ópticos sintonizáveis [1][10].

Em geral, os filtros ópticos trabalham com base nos efeitos da interferência que são extremamente seletivos quanto ao comprimento de onda. Quando um filtro é sintonizado em determinado comprimento de onda, ocorre o reforço deste sinal devido à interferência construtiva, enquanto para outros comprimentos de onda ocorre interferência destrutiva podendo chegar a eliminá-los completamente.

2.10 Transponder

O transponder adapta o sinal que chega do cliente da rede óptica para um sinal apropriado para ser usado dentro da rede óptica, realizando o processo inverso na direção oposta.

O comprimento de onda gerado pelo transponder está tipicamente de acordo aos padrões ITU na janela de 1550 nm, enquanto os sinais de entrada podem estar na região de 1310 nm. O transponder pode adicionar um cabeçalho extra para propósitos de gerenciamento de redes. Ele pode também adicionar FEC (*forward error correction*), particularmente para sinais de 10 Gbps e taxas maiores. O transponder tipicamente monitora a taxa de erro de bit do sinal nos pontos de ingresso e egresso da rede. Por estes motivos, a adaptação é feita comumente através de conversão O/E/O (óptica-elétrico-óptica).

Pode-se evitar o uso de transponders fazendo com que a função de adaptação seja realizada dentro do equipamento do cliente que esteja usando a rede óptica, como por exemplo elemento de rede SONET/SDH, porém esta solução é proprietária e não existe uma padronização ainda [1].

Os transponders tipicamente correspondem à maior parte dos custos, espaço e consumo de energia de um OLT (a ser explicado no próximo item). Por isso reduzir o número de transponders ajuda a reduzir tanto o custo como o tamanho do equipamento empregado [1].

2.11 OLT

OLTs (terminais de linhas ópticas) são usados em cada lado de uma conexão ponto-a-ponto para multiplexar e demultiplexar comprimentos de onda. Os elementos básicos de um OLT são o multiplexador, os transponders (nem sempre necessários) e opcionalmente amplificadores ópticos.

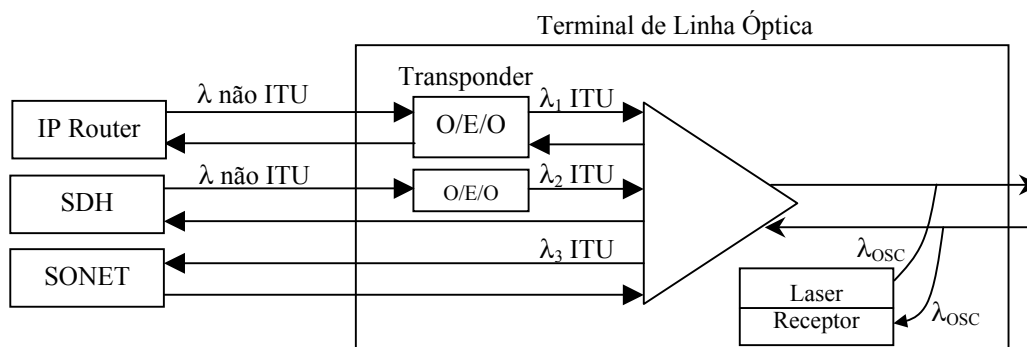


Fig. 2.4 – Diagrama de blocos de um OLT com diferentes clientes da rede óptica que utilizam ou não o padrão ITU de λ . O OLT termina um canal de supervisão óptico (OSC) usado no enlace da fibra.

2.12 OADM

OADM (*optical add/drop multiplexer*) realiza a função de derivar comprimentos de onda de um conjunto de sinais de entrada composto por vários λ multiplexados, e então adicionar outros comprimentos de onda no conjunto de sinais de saída. O OADM no domínio óptico é equivalente ao ADM no domínio elétrico.

OADMs podem possuir arquiteturas em paralelo ou em série. Na primeira arquitetura todos os canais de chegada são demultiplexados, alguns são derivados e os outros passam direto e são multiplexados novamente junto com os sinais inseridos. Na outra arquitetura um ou mais canais podem ser derivados a partir dos que chegam. Para ambas as arquiteturas há a possibilidade de se trabalhar com bandas, isto é, ao invés de se derivar comprimentos de onda em separados, pode-se derivar uma faixa de frequência que contém vários λ s. A Fig. 2.5 (a) mostra um diagrama de blocos de um OADM genérico. A Fig. 2.5 (b) mostra um OADM trabalhando integrado com caixas ADM SDH/SONET, fazendo *grooming* de sinais STM-n/OC-3n.

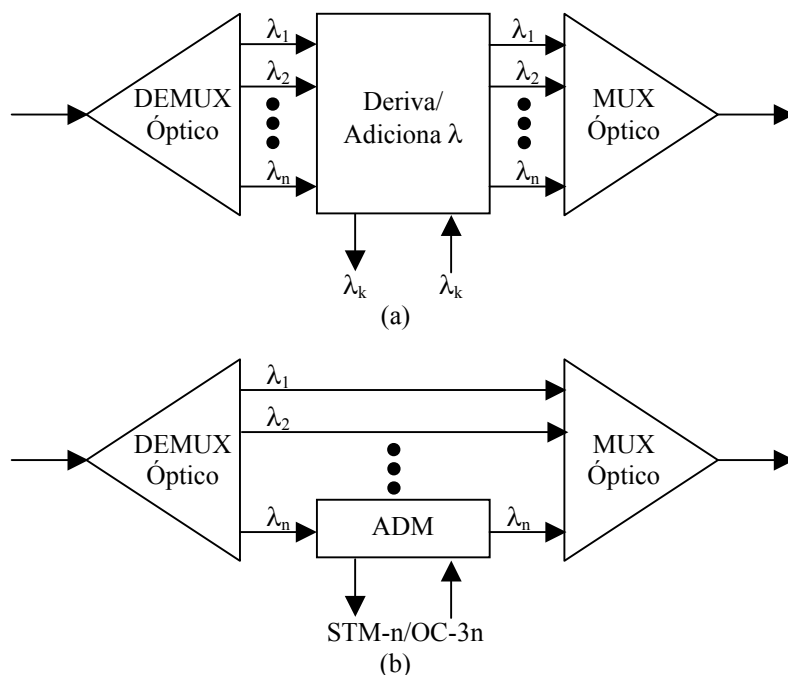


Fig. 2.5 – Diagrama de blocos de um OADM: (a) configuração genérica. (b) exemplo de *add/drop* de um único λ com um ADM SDH/SONET conectado.

As principais características de um OADM são: o número total de comprimentos de onda que podem ser suportados; o número máximo de comprimentos de onda que podem ser derivados/inseridos no OADM; restrições eventuais de inserção/derivação de λ s específicos; facilidades para inserir e derivar canais adicionais; modularidade da arquitetura; os efeitos na camada física de adicionar novos nós ou canais; e capacidade de reconfiguração do OADM.

2.13 OXC

Os OADMs são dispositivos muito úteis em topologias simples de rede, tal como a topologia linear ou anel, e com um número não muito grande de comprimentos de onda. Para topologias mais complexas em malha e com um grande número de comprimentos de onda, OXC (*optical crossconnects*) são necessários. OXCs são elementos fundamentais para possibilitar redes ópticas reconfiguráveis, onde caminhos ópticos podem ser ativados e desativados conforme necessário, sem terem que ser estaticamente configurados.

Os OXC permitem conexões com variados equipamentos de diferentes tecnologias, como SDH/SONET, roteadores IP, switches ATM e terminais WDM. Além de prover *passthrough* de relativo baixo custo para tráfegos que não terminam no seu nó.

O OXC pode ser visto como o conjunto de OLTs com o switch *crossconnect*. Porém, aqui será considerado que o OXC não inclui OLTs, uma vez que eles podem ser adquiridos como produtos diferentes[1].

Funcionalmente, um OXC pode ser dividido em núcleo e portos (ou portas). No núcleo situa-se o switch que executa a função de comutação. Nos portos situam-se placas que são usadas como interfaces para comunicar com outros equipamentos. As interfaces dos portos podem ou não incluir conversores O/E ou O/E/O.

Há diferentes tipos de OXCs e diferentes configurações de interconexão entre OXCs e OLTs em um nó. Estas diferenças se devem à forma, óptica ou eletrônica, da comutação, ao uso de conversores O/E e O/E/O e à forma de interconexão dos OXCs com os equipamentos ao redor. Neste trabalho está-se interessado nos OXC com núcleo óptico.

OXC com núcleo óptico, em especial, o OXC totalmente óptico, onde o sinal permanece no domínio óptico quando faz uma passagem direta pelo nó, tem uma série de vantagens sobre os outros OXC, como maior capacidade de comutação, menor custo por porto, menor consumo de potência e espaço ocupado, além de ser transparente à taxa de bits, porém tem como desvantagem a impossibilidade de realizar *grooming* e conversão de comprimento de onda, possuir somente interfaces proprietárias (já que ainda não existe padronização), e o gatilho de proteção/comutação ser feito a partir da potência óptica e não com base na BER.

A Fig. 2.6 mostra um OXC totalmente óptico consistindo de um conjunto de switches ópticos, um para cada comprimento de onda. Com F fibras e W comprimentos de onda em cada fibra, cada switch é um switch $2F \times 2F$, para garantir flexibilidade para derivar e inserir qualquer comprimento de onda no nó.

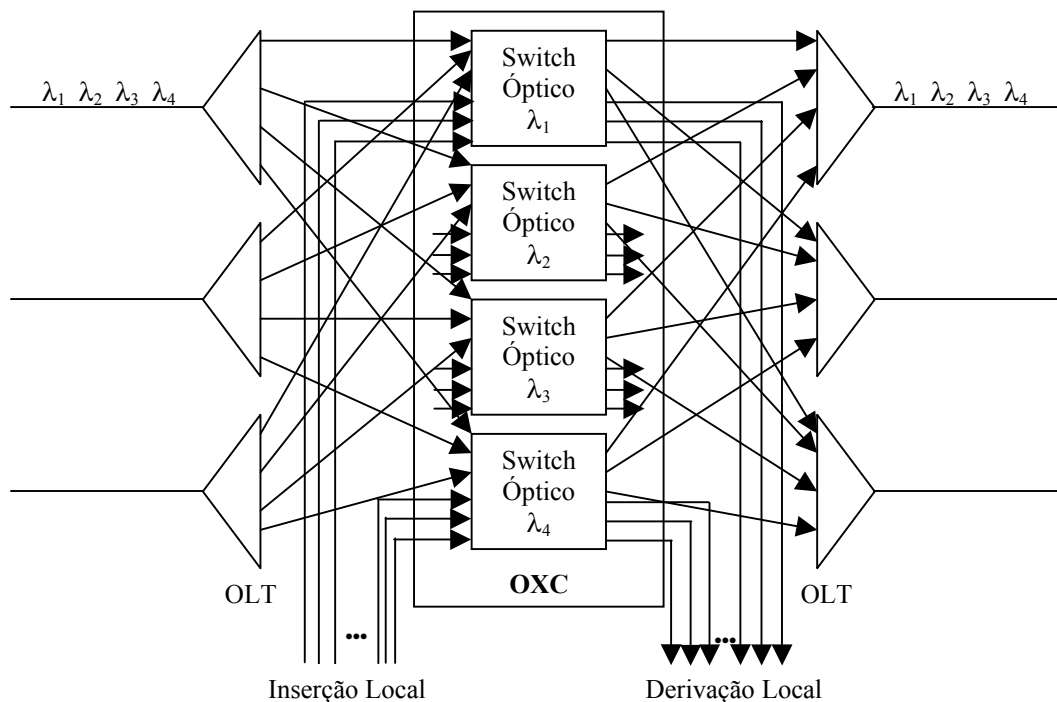


FIG. 2.6 – OXC com núcleo óptico

2.14 Balanço de Potência

A camada física deve ser projetada de tal maneira a levar em conta uma série de degradações, que resultam em penalidades de potência ao sistema. Uma maneira prática de definir a penalidade de potência é como sendo a redução da relação sinal-ruído quantificada pelo valor de γ , devido a uma degradação específica. O valor de γ é o argumento do

$$\text{parâmetro } Q, \text{ isto é, } \text{BER} = Q(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\gamma}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx.$$

Na Tab. 2.3 é exemplificado um balanço de potência considerando diversas degradações e que é apropriado para sistemas amplificados tendo a ASE como ruído dominante. Primeiro é determinado o valor ideal do parâmetro γ que é necessário. Para uma BER de 10^{-12} que é um valor típico assumido em sistemas de alta velocidade, é necessário um $\gamma = 7$ ou de 17 dB. Em seguida, adiciona-se as penalidades de potência devido a cada degradação. O valor final de γ será o valor com que se trabalhará para ser alcançado no receptor.

É considerada também a utilização de FEC utilizando o código corretor de erro Reed-Solomon (RS) 255/239 que provê um ganho de codificação em torno de 5 a 6 dB com

uma redundância de 6,7% [1][21][22][23][24][25]. O ganho de codificação de um código FEC é o decréscimo da sensibilidade do receptor que este provê para uma mesma BER comparado com o sistema não codificado (para a mesma potência transmitida) [1].

| Degradação | Alocação (dB) |
|--------------------------------|---------------|
| γ ideal | 17 |
| Transmissor | 1 |
| Crosstalk | 1 |
| Dispersão Cromática | 2 |
| Não-linearidades | 1 |
| PDL | 3 |
| Envelhecimento dos Componentes | 3 |
| Margem | 3 |
| Ganho de Codificação | (5) |
| γ necessário | 26 |

Tab. 2.3 Um exemplo de projeto que aloca penalidades de potência para várias degradações de transmissão.

Este método utilizado é apenas uma aproximação, pois a consideração de subtrair o ganho de codificação diretamente do valor de γ é adequada somente se todas as degradações de transmissão fossem similares a degradações de um canal AWGN (*additive white gaussian noise*). A degradação devido à ASE permite fazer tal aproximação. Porém, os efeitos de não-linearidades na fibra e dispersão cromática levam a distorção do pulso e interferência intersimbólica (ISI) que não são corretamente modelados por um canal AWGN [21]. Mas dependendo do caso, valores similares para degradações lineares e não-lineares podem ser conseguidos como em [24], onde um ganho de 6,2 dB no fator Q foi conseguido utilizando RS 255/233 (redundância de 14%).

Pode-se associar a relação sinal-ruído óptico ($OSNR = \langle P_{rec} \rangle / P_{ASE}$) com a correspondente BER, para sistemas cujo ruído ASE é dominante, através da seguinte equação obtida em [1]:

$$\gamma = \frac{2 \times OSNR \times \sqrt{\frac{B_o}{B_e}}}{1 + \sqrt{4 \times OSNR + 1}} \quad @ \quad 2 \times B_o \gg B_e$$

Onde B_o é a largura de banda óptica vista pelo receptor e B_e é a faixa elétrica do receptor. Isolando o OSNR, tem-se:

$$\text{OSNR} = \frac{\left(\sqrt{\frac{B_o}{B_e}} + \gamma \right) \cdot B_e \cdot \gamma}{B_o} \quad @ \quad 2 \times B_o \gg B_e$$

Com o valor da equação acima, pode-se ter uma estimativa de quanto é a relação sinal-ruído, que um determinado sinal deve produzir no receptor para prover determinada BER.

Considerando um sistema com penalidades iguais ao da Tab. 2.3, pode-se calcular, para um enlace ponto-a-ponto, o número máximo M de amplificadores ópticos pelo qual um caminho óptico pode passar sem necessitar regeneração, como sendo [25]:

$$M \leq \left\lfloor \frac{P_L}{2 \cdot \text{OSNR} \cdot n_{sp} \cdot h \cdot f_c \cdot (G-1) \cdot B_o} \right\rfloor$$

onde P_L é a potência média lançada na fibra; n_{sp} é o fator de emissão espontânea; h é a constante de Planck; f é a frequência da portadora; e G é o ganho saturado de cada amplificador considerando que todos os amplificadores fornecem o mesmo ganho. O valor da P_{ASE} é dado por $2 \cdot n_{sp} \cdot h \cdot f_c \cdot (G-1) \cdot B_o$.

Considerando os seguintes valores típicos:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_b = 10 \text{ Gbps} \\ B_e = 0,75 \times R_b = 7,5 \text{ GHz} \\ B_o = 50 \text{ GHz} \end{array} \right\} @ \gamma = 26 \text{ dB} \rightarrow \text{OSNR} = 67,42$$

Considerando $n_{sp} = 2$, $G = 23 \text{ dB}$ (para compensar perdas na fibra ao longo de um enlace de 100 km, emendas e conectores) e $P_L = 3 \text{ mW}$, tem-se que o número máximo de *spans* é 8.

Este alcance de 8 *spans*, ou 800 km considerando cada *span* de 100 km, é válido para enlaces ponto-a-ponto. Caso o caminho óptico passe por nós intermediários, que possuam por exemplo, OXC, esse valor será menor, pois normalmente o OXC possui um amplificador óptico na sua entrada para compensar as perdas do último *span* e um outro amplificador óptico de saída para compensar as perdas internas.

CAPÍTULO 3 – Arquiteturas de Redes Ópticas e Camadas Clientes

A camada óptica, que provê caminhos ópticos às camadas clientes, se tornou a principal camada de transmissão nos *backbones* das redes de telecomunicações. A grande questão é sobre quais tecnologias usar sobre a camada óptica para o fornecimento de serviços e de como elas vão interagir entre si. As principais* redes clientes são o SDH/SONET, ATM, IP e MPLS. Neste capítulo será abordado uma parte introdutória sobre essas redes clientes para oferecer um maior embasamento sobre arquitetura de redes ópticas.

Para um melhor entendimento, é interessante situar as redes clientes de acordo com uma arquitetura de protocolos, onde o modelo de referência *OSI (Open Systems Interconnection)* da ISO (*International Standard Organization*) é utilizado como padrão, e como será visto, é possível representar estruturas complexas, como IP sobre ATM sobre SDH de acordo com este modelo.

3.1 Modelo de Referência OSI

O modelo de referência OSI foi desenvolvido pela ISO como um modelo de arquitetura de protocolos para computadores e como uma estrutura para desenvolver padrões de protocolos [11].

Este modelo é dividido em 7 camadas, a saber, aplicação, apresentação, sessão, transporte, rede, enlace de dados e física. No presente trabalho, as 4 camadas inferiores são as mais importantes e executam resumidamente as seguintes funções:

Transporte – provê transferência transparente de dados confiáveis entre nós. Provê controle de fluxo e detecção de erros fim-a-fim.

Rede – provê às camadas superiores independência quanto a transmissão de dados e tecnologias de comutação usadas para conectar sistemas. É responsável por estabelecer, manter e finalizar conexões.

Enlace de Dados – provê uma transferência confiável de informação através do enlace físico. Envia quadros com a sincronização necessária, controle de erros e controle de fluxos.

* Gigabit e 10-Gigabit Ethernet são redes clientes emergentes.

Física – está relacionado com a transmissão de fluxos de bits através de um meio físico, especificando características mecânicas, elétricas e funcionais para acessar o meio físico.

Uma outra arquitetura extremamente utilizada, e que se tornou o padrão de mercado, o TCP/IP, é dividido em 5 camadas (alguns autores dividem em 4), a saber, aplicação, transporte, internet, acesso a rede e física. Informações mais específicas podem ser conseguidas em [11][12][13][14].

3.2 SDH/SONET

O SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) é um padrão ITU e o SONET (*Synchronous Optical Network*) é um padrão ANSI (*American National Standards Institute*). Estas tecnologias são os padrões de transmissão e multiplexação para sinais de alta velocidade dentro das infra-estruturas das operadoras espalhadas pelo mundo.

Anteriormente ao SDH/SONET, a infra-estrutura das operadoras era baseada em PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*), porém possuía vários problemas relacionados à multiplexação, gerenciamento, interoperabilidade e *networking* o que levou operadoras e fabricantes a procurarem um novo padrão [2]. Tráfegos não SDH/SONET podem ser mapeados em tributários virtuais e transportados por sinais STM (*Synchronous Transport Module*) no padrão SDH e por sinais STS (*Synchronous Transport Signal*) no padrão SONET. A Tab. 3.1 mostra as taxas de transmissão para o padrão PDH e a Tab. 3.2 mostra as taxas de transmissão para os padrões SDH e SONET.

| Nível | EUA | Europa |
|-------|--------------|--------------|
| 0 | 64 kb/s | 64 kb/s |
| 1 | 1,544 Mb/s | 2,048 Mb/s |
| 2 | 6,312 Mb/s | 8,448 Mb/s |
| 3 | 44,736 Mb/s | 34,368 Mb/s |
| 4 | 139,264 Mb/s | 139,264 Mb/s |

Tab. 3.1 – Taxas de transmissão para os sinais PDH.

| Sinal SONET | Sinal SDH | Taxa de Tx (Mb/s) |
|-------------|-----------|-------------------|
| STS-1 | | 51,84 |
| STS-3 | STM-1 | 155,52 |
| STS-12 | STM-4 | 622,08 |
| STS-24 | | 1244,16 |
| STS-48 | STM-16 | 2488,32 |
| STS-192 | STM-64 | 9953,28 |

Tab. 3.2 – Taxas de Transmissão para os sinais SDH/SONET.

Como pode ser visto na Tab. 3.2, as taxas de transmissão no SDH/SONET são múltiplos inteiros da taxa básica, diferente do padrão PDH, que realiza *bit stuffing* para multiplexar taxas menores devido à falta de sincronização dos relógios de cada equipamento PDH. Informações mais aprofundadas sobre PDH, SDH e SONET podem ser consultadas em [1][2][5][6][8].

3.2.1 – Camadas SDH/SONET

Como pode ser visto na Fig. 3.1, o SDH consiste de quatro subcamadas: caminho, seção de multiplexação, seção de regeneração e física. Cada camada, exceto a camada física, tem um conjunto de bytes no cabeçalho que são utilizados para diversos propósitos.

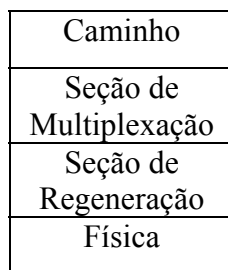


Fig. 3.1 –Camadas do SDH.

A camada de caminho no SDH (e SONET) é responsável por conexões fim-a-fim entre nós e é finalizada somente nas pontas da conexão SDH.

Cada conexão atravessa um conjunto de enlaces e nós intermediários da rede. A camada seção de multiplexação (camada de linha no SONET) pode multiplexar várias conexões da camada de caminho num único enlace entre dois nós. Por isso, a camada seção de multiplexação é finalizada em cada multiplexador de terminal de linha (TM) intermediário ou multiplexadores de inserção/derivação (ADM) ao longo da rota de uma

conexão SDH. A camada seção de multiplexação é também responsável por executar certos tipos de comutação de proteção para restaurar serviços em caso de falha na linha.

Cada enlace consiste num número de seções, correspondendo a segmentos de enlace entre regeneradores. A camada seção de regeneração (camada de seção no SONET) é finalizada em cada regenerador na rede.

Por último, a camada física é responsável pela transmissão dos bits pela fibra.

3.2.2 – Elementos de uma Infraestrutura SDH/SONET

SDH/SONET é empregado em 3 tipos de configuração de rede: anel, linear e ponto-a-ponto. As primeiras aplicações eram na forma de enlaces ponto-a-ponto, e esta topologia ainda é utilizada para muitas aplicações. Neste caso, os nós em cada extremidade do enlace são chamados de multiplexadores terminais (TM). TM as vezes é chamado de equipamento terminal de linha (LTE). A função de inserir e derivar fluxos de baixa taxa a partir de fluxos de alta taxas é realizada pelos ADMs (*add/drop multiplexer*). Pode-se multiplexar por exemplo 16 STM-1 em um único STM-16 ou 4 E4 (taxa PDH de 139.264 Mb/s) em um fluxo de STM-4.

Outro componente importante na infra-estrutura SDH/SONET é o DCS (*Digital Crossconnect*). Um DCS é usado para gerenciar todas as facilidades de transmissão na estação central. DCS é responsável também por realizar *grooming*, que é (de)multiplexar tráfegos de mais baixa velocidades em tráfegos de alta velocidade (este tráfego de mais baixa velocidade pode ser tanto fluxo PDH como SDH/SONET). O DCS também monitora a performance do sistema. A evolução do DCS é o OXC.

3.2.3 – Considerações Finais Sobre SDH/SONET

Geralmente redes SDH/SONET empregam sistemas de gerenciamento centralizado, responsáveis por provisionar recursos. A configuração de caminhos através de uma rede SDH/SONET envolve alocação de *time slots* de tal forma que as conexões fim-a-fim sejam mantidas. Não existem restrições de QoS para a conexão SDH/SONET. Largura de banda é determinada pelo *time slot*, e não ocorre nenhum tipo de congestionamento na rede. Uma vez que os dados são inseridos na conexão, eles chegarão na saída com um alto grau de confiabilidade.

Não há um sistema de gerenciamento padronizado para SDH/SONET, cada fabricante normalmente implementa um sistema proprietário para o gerenciamento em seus equipamentos. Numa rede SDH/SONET grande, podem existir várias sub-redes SDH/SONET gerenciadas independentemente. A estrutura do quadro SDH/SONET e protocolos padronizados definem mecanismos para o gerenciamento de informação para serem distribuídos dentro de uma rede SDH/SONET [15].

A tecnologia SDH/SONET possui tanto hardware como software muito testados e estáveis, com um extenso cabeçalho que permite operação, administração, manutenção e provisão (OAM&P). Os custos dos investimentos nesta tecnologia ainda não foram completamente recuperados, logo as operadoras dificilmente migrarão para uma nova tecnologia que não interopere com o SDH/SONET. Logo, pelos próximos anos dificilmente o SDH/SONET deixará de ser a principal rede de transporte das redes de alta velocidade.

3.3 – ATM

O ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) foi desenvolvido como uma parte da Rede Digital de Serviços Integrados de Banda Larga (B-RDSI), tendo como meta inicial prover conexões de alta velocidade com QoS (qualidade de serviço) garantido. O conjunto de protocolos ATM e serviços é bem grande, e nem sempre implementado em cada dispositivo. Por exemplo, ATM define tanto circuitos virtuais permanentes (PVC) e circuitos virtuais comutados (SVC). PVCs provêm conexões estáticas (criadas manualmente), e os SVCs criam conexões dinamicamente estabelecidas baseadas na demanda e estado corrente da rede. Porém, as capacidades do SVC não são implementadas em todos os dispositivos ATM, em parte por padrões incompletos, custo e falta de demanda [15].

3.3.1 – Camadas ATM

A tecnologia ATM é organizada em 4 camadas, a saber, camadas superiores, camada de adaptação ATM, camada ATM e camada física, e suas funções são explicadas a seguir.

Camada Física - Geração e delimitação das células ATM (tamanho fixo de 53 bytes); controle de erros por meio do campo HEC (*Header Error Control*) do cabeçalho da célula; e acesso ao meio de transmissão.

Camada ATM - Multiplexação e demultiplexação das células para compartilhamento do meio por canais lógicos; roteamento/encaminhamento das células para seus destinos; geração e retirada dos cabeçalhos das células; e controle de fluxo na transmissão.

Camada de Adaptação ATM (AAL – ATM Adaptation Layer) – Essa camada tem como função interagir com a camada superior, reagrupando as células, retornando os dados ao formato original e entregando à camada superior. Ou seja, permite o uso da tecnologia ATM pelas aplicações e outros protocolos. Quatro camadas de adaptação ATM, AAL-1, AAL-2, AAL-3/4 e AAL-5, são descritas na recomendação ITU I.363, porém merecem uma atenção especial a AAL-1, que transporta uma taxa de bits constantes tais como circuitos de voz e vídeo, e a AAL-5, que transporta pacotes de tamanho variáveis tendo como principal uso o transporte de pacotes IP sobre uma rede ATM.

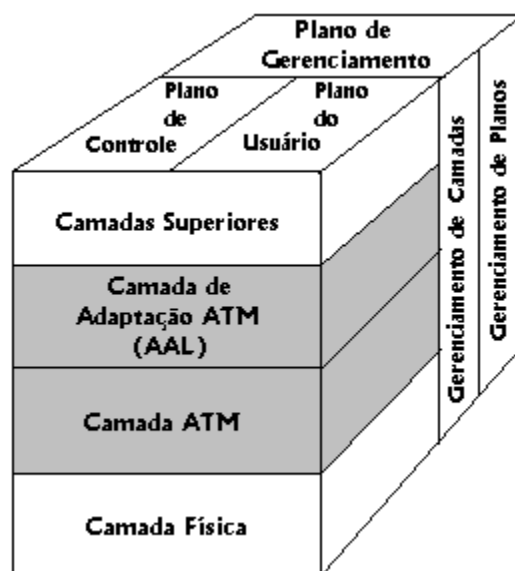


Fig. 3.2 – Arquitetura do Protocolo ATM

Como pode ser visto na Fig. 3.2, além das quatro camadas, o modelo ATM consiste de três planos separados.

Plano do Usuário – Permite transferência de informações do usuário, junto com controles, como o controle de fluxo e controle de erro.

Plano de Controle – Executa as funções de controle de chamadas e controle de conexões.

Plano de Gerenciamento – Inclui o *gerenciamento de planos*, que é responsável por gerenciamento de funções relacionadas ao sistema como um todo e provê coordenação entre todos os planos, e o *gerenciamento de camadas*, que é responsável por gerenciamento de funções relacionadas a recursos e parâmetros pertencentes ao próprio protocolo.

3.3.2 – Interfaces ATM

Uma rede ATM consiste de comutadores ATM conectados por enlaces ponto-a-ponto ou interfaces. As interfaces mais importantes padronizadas pelo ATM Fórum são a UNI (*user-network interface*) e a NNI (*network-network interface*). A UNI conecta sistemas terminais (*hosts*, roteadores) a um comutador ATM, e um NNI conecta dois comutadores ATM.

A UNI ainda tem a distinção de UNI privada ou pública, dependendo se o sistema terminal é conectado a uma rede privada ou pública, assim como a NNI também. O PNNI (*private network-network interface*) e o B-ICI (*Broadband Inter Carrier Interface*) são usados para sinalização e roteamento na rede ATM.

3.3.3 – Considerações Finais Sobre ATM

Geralmente, o ATM não necessita de um sistema de gerenciamento centralizado (as conexões podem ser estabelecidas através de protocolos ao invés de gerenciamento). Porém, usualmente um sistema de gerenciamento existirá para prover facilidades centralizadas para monitoração, faturamento (*billing*), contabilidade e autenticação [15].

A desvantagem do ATM é primeiramente seu custo. Os protocolos ATM são muito complexos, e por isso caros e lentos para implementar. Normalmente, o ATM é usado abaixo da camada IP, e acima da camada SDH/SONET, provendo conexões reconfiguráveis abaixo da camada IP. Soluções mais baratas como MPLS estão sendo utilizadas para reduzir custos, simplificar protocolos e facilitar a integração na arquitetura IP.

3.4 – IP

IP (*Internet Protocol*) é disparado a tecnologia mais utilizada no mundo da interconexão de redes de longa distância. O IP é o protocolo de rede usado pela Internet e nas intranets. IP é uma tecnologia, ou protocolo, projetado para trabalhar sobre uma variedade de camadas inferiores, sendo este um dos motivos do grande sucesso do IP.

A Fig. 3.3 mostra o IP numa estrutura de arquitetura em camadas. Algumas camadas de enlaces de dados tradicionais no qual o IP opera estão associados a redes locais tradicionais como Ethernet e token ring. IP também opera sobre linhas seriais de baixa velocidades, assim como linhas de fibras ópticas de alta velocidades usando protocolos da camada de enlace de dados bem conhecidos como HDLC (*high-level data link control*) ou PPP (*point-to-point protocol*). Mais adiante neste capítulo será visto várias estruturas de camada para mapear IP sobre a camada óptica.

| | | |
|---------------------------------|---------------|------|
| FTP HTTP SMTP | | |
| TCP UDP | | |
| IP | | |
| Ethernet | Token Ring | ATM |
| | PPP | HDLC |
| SDH/SONET | Camada Óptica | |
| Cabo de Par Trançado ou Coaxial | | |

Fig. 3.3 – O IP numa arquitetura em camadas.

O IP não garante entrega de dados confiáveis e na seqüência entre a origem e o destino. Este trabalho é feito pela camada de transporte, tipicamente o TCP (*transmission control protocol*). Outro protocolo de transporte comumente usado para transferências de mensagens simples sobre o IP é o UDP (*user datagram protocol*). Aplicações como FTP (*file transfer protocol*), SMTP (*simple mail transfer protocol*) e o HTTP (*hyper text transfer protocol*) usam o TCP como protocolo de transporte, enquanto outras aplicações como DNS (*domain name service*) e SNMP (*simple network management protocol*) usam UDP para o transporte (em determinados casos o DNS usa o TCP).

As redes IP não necessitam sistemas de gerenciamento centralizados, e freqüentemente para pequenas redes nem se utiliza tal sistema. Gerenciar uma rede IP é conceitualmente simples, roteadores podem se auto-configurar, isto é, aprender suas tabelas de roteamento a partir dos vizinhos, onde um dos principais protocolos de roteamento é o OSPF (*open shortest path first protocol*). Na realidade, o gerenciamento de redes IP

normalmente é muito mais do que o gerenciamento de roteadores, pois podem envolver *Firewalls* (programas de proteção contra ataques hackers), moldagem de tráfego, VPN (redes privadas virtuais) entre outras coisas.

A camada IP não oferece QoS. O IETF (*Internet Engineering Task Force*) está padronizando o DiffServ (*Differentiated Services*) e o IntServ (*Integrated Services*) que poderão oferecer um suporte limitado. O IP confia nas mensagens dos roteadores para identificar falhas nos enlaces entre roteadores, porém estes são geralmente lentos para responder a respostas de falhas no enlace [15].

3.5 – MPLS

O MPLS é uma nova tecnologia no mundo IP e possui várias aplicações. A tendência para as redes de alta velocidade é a convergência num único plano de controle para a malha de comutação e os equipamentos de borda, numa rede baseada em IP/MPLS sobre a camada óptica. Apesar de ser um assunto extenso, com diversos livros dedicados somente a ele, como por exemplo [16][17], esta seção tentará sintetizar os principais aspectos sobre esta tecnologia que já é uma realidade no mercado, e tende a dominar os *backbones* das redes de comunicações espalhadas pelo mundo.

3.5.1 – Modelo *Overlay* e Modelo *Peer*

Na Fig. 3.4 vê-se um cenário típico que representa uma rede de comunicação composta por uma nuvem de malha de comutação, equipamentos de borda e subredes IP. Os equipamentos de borda são usualmente roteadores IP, e são responsáveis pela interconexão de subredes IP através da malha de comutação. São exemplos de tal malha de comutação:

- Rede transporte SDH com comutadores ATM;
- Rede transporte óptica e gigarouters IP (IP/SDH ou IP/DWDM).

Usualmente divide-se o modelo da infra-estrutura da Fig. 3.4 em dois planos, que possuem funções diferentes: o plano de controle e o plano de encaminhamento. O plano de controle realiza entre diversas funções, sinalização, roteamento e policiamento de tráfego. O plano de encaminhamento tem sua operação comandada pelo plano de controle e possui

funções relativas à propagação de pacotes IP, como por exemplo, encapsulamento, segmentação e remontagem, e rotulação de datagramas [18].

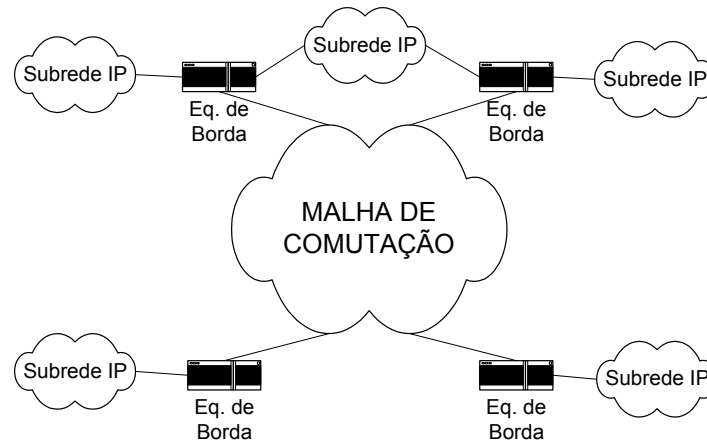


Fig. 3.4 – Modelo de uma rede para a comutação IP

No modelo *overlay* o plano de controle na borda da rede é estabelecido de forma independente do plano de controle no interior da malha de comutação. Isto representa a manutenção de protocolos nativos de controle nos equipamentos de borda (ex: roteadores IP) e na malha de comutação (ex: comutadores ATM). Porém, ocasiona a redundância de funções como endereçamento e sinalização.

No modelo *peer* o plano de controle é unificado através da manutenção das funções referentes ao protocolo de rede (IP), eliminando-se as funções de controle específicas da malha de comutação [18].

Como exemplo de uma rede seguindo o modelo *peer*, pode-se considerar uma malha de comutação ATM, como não haverá mais sinalização, nem endereçamento ATM, o plano de controle IP deve prover a sinalização para a criação de caminhos comutados através da malha de comutação. Logo, os comutadores ATM são na realidade roteadores IP que podem prover a altíssima velocidade de comutação do *hardware* ATM. A sinalização no modelo *peer* deve agir sobre o *hardware* ATM associando rótulos (neste caso, o par VPI/VCI do cabeçalho ATM que identifica o circuito) ao tráfego que será comutado.

O MPLS é uma solução do IETF que emprega o modelo *peer* para a comutação IP independente da tecnologia presente na malha de comutação.

3.5.2 – Conceitos Básicos

Rótulo → pequeno identificador, de tamanho fixo, com significado local que é usado para identificar uma *FEC* (Classe de Equivalência de Encaminhamento). O rótulo que é colocado num pacote particular representa a FEC no qual o pacote está associado.

LSR (*Label Switch Router*) → equipamento de comutação (ex: roteador IP ou comutador ATM) que suporta MPLS. Um LSR localizado na periferia da rede MPLS denomina-se LSR de borda (*Edge LSR*), enquanto um LSR localizado no núcleo da rede denomina-se LSR Núcleo (*Core LSR*).

LSP (*Label Switch Path*) → caminhos comutados estabelecidos por ação de protocolos do plano de controle, ou por ação da gerência de rede. Cada LSP está associado à uma FEC, no qual determina quais datagramas serão encaminhadas por ele. Um LSP pode ser definido como uma seqüência ordenada de LSRs, sendo que o primeiro LSR, denomina-se *LSR de ingresso* e o último *LSR de egresso*.

LDP (*Label Distribution Protocol*) → LDP é o protocolo de distribuição de rótulos que cria os LSPs através do mapeamento de informações da camada de rede diretamente em caminhos comutados na camada de enlace de dados.

3.5.3 – Engenharia de Tráfego e IP/MPLS

O MPLS permite integrar a capacidade de engenharia de tráfego ao plano de controle IP. Engenharia de tráfego é a tarefa de realizar o mapeamento dos fluxos de tráfego em uma infra-estrutura física de transporte de modo a atender critérios definidos pela operação da rede [18]. Com o MPLS, pode-se reservar largura de banda ao longo de todos os enlaces no momento que um LSP é configurado, para garantir um determinado QoS.

Pacotes pertencentes a um LSP podem ser rapidamente re-roteados para outro LSP se houver uma falha na rede. Por exemplo, pode-se configurar dois LSPs a um par de nós ao longo de diversos caminhos. Se um LSP falhar, pode-se re-rotear os pacotes deste LSP para o outro e assegurar a rápida restauração do serviço. Por isso, o MPLS pode ser usado para prover restauração rápida em uma rede IP em casos de falha, o que não é possível através de mecanismos de roteamento IP por si só.

Dois protocolos de sinalização estão disponíveis para configurar LSPs em um rede, o RSVP (*Resource Reservation Protocol*) e o CR-LDP (*label distribution protocol with constrained routing*). O RSVP é baseado na reservas de recursos e devido a intensa sinalização, pode comprometer a escalabilidade do MPLS [16][18]. O modelo de QoS do CR-LDP define um grande número de parâmetros que são similares aos da rede ATM [16], e como pode ser visto como uma extensão do LDP, a princípio, pode ter vantagens sobre RSVP. Uma outra opção para dar suporte a QoS é utilizar serviços diferenciados (DiffServ) que baseia-se no oferecimento de QoS a fluxos agregados pertencentes a uma mesma classe de serviço.

3.6 – Camada Óptica

A camada óptica provê caminhos ópticos para outras camadas tais como SDH/SONET, IP ou ATM. Neste contexto, a camada óptica pode ser vista como uma camada servidora, e as camadas superiores que fazem uso dos serviços oferecidos pela camada óptica pode ser vista como uma camada cliente.

A ITU dividiu a camada óptica em 3 sub-camadas. No topo está a *camada de canal óptico* (OCh). Esta camada cuida do roteamento fim-a-fim dos caminhos ópticos. Uma definição mais completa de caminho óptico é a seguinte, uma trilha de canal óptico entre dois nós que utiliza um comprimento de onda inteiro. Um caminho óptico atravessa vários enlaces na rede, onde é multiplexado com outros comprimentos de onda carregando outros caminhos ópticos. Os caminhos ópticos podem ser regenerados durante sua rota[1]. Entretanto, a definição em [19], considera que o caminho óptico não pode sofrer regeneração no seu percurso.

Cada enlace entre OLTs ou OADMs representa um *seção de multiplexação óptica* (OMS) carregando vários comprimentos de onda. Cada OMS consiste em vários segmentos de enlace, cada segmento sendo a porção do enlace entre dois amplificadores ópticos. Cada uma destas porções é uma *seção de transmissão óptica* (OTS). O OTS consiste do OMS junto com canal de supervisão óptico (OSC).

Em [1], o autor simplifica algumas definições da ITU, e sub-divide a camada de canal óptico em várias sub-camadas. Uma seção transparente-canal óptico (OCh-TS) que representa a seção de um caminho óptico dentro de uma sub-rede totalmente óptica. Dentro

desta seção, um caminho óptico é carregado opticamente sem qualquer conversão para o domínio elétrico. Na fronteira de um OCh-TS, um caminho óptico é regenerado. Logo acima do OCh-TS está a *seção-canal óptico* (OCh-S) que adiciona algum cabeçalho ao caminho óptico, tal como FEC (*forward error correction*), para condicionar o sinal para transporte sobre uma sub-rede totalmente óptica. Finalmente, o *caminho-canal óptico* (OCh-P) que representa o transporte fim-a-fim de um caminho óptico através de vários regeneradores no caminho. A Fig. 3.5 mostra estas sub-camadas da camada óptica.

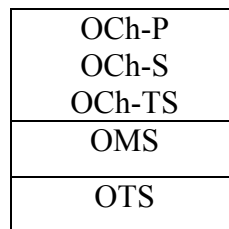


Fig. 3.5 – Sub-camadas da camada óptica.

3.6.1 – ITU-T *Digital Wrapper*

O ITU-T tem estudado novas arquiteturas para as redes de transporte ópticas. O *digital wrapper* define um novo conjunto de bytes de cabeçalho adicionado ao sinal e associado à camada óptica.

As vantagens deste método são as seguintes: Primeiro, bytes de cabeçalho suficientes podem ser adicionados de tal forma a prover FEC e suportar uma estrutura de gerenciamento adequada para as redes ópticas. Segundo, um novo padrão baseado nesta técnica pode permitir uma melhor interoperabilidade entre diferentes fabricantes por meio de regeneradores. Terceiro, a técnica não está limitada aos sinais SONET/SDH.

As principais desvantagens do *digital wrapper* são que ele não é apropriado para ser usado com equipamentos legados, e que ele necessita o desenvolvimento de um novo conjunto de componentes para suportar uma nova hierarquia de taxas de transmissão. Entretanto, novos componentes já foram desenvolvidos para suportá-lo, já estando disponíveis em vários equipamentos WDM [1].

A Fig. 3.6 mostra a estrutura do *digital wrapper*, onde fica evidenciado as funções de operação e gerenciamento (OAM), e FEC. A sub-camada OCh-S é a mais propícia para o transporte dos *wrappers*.

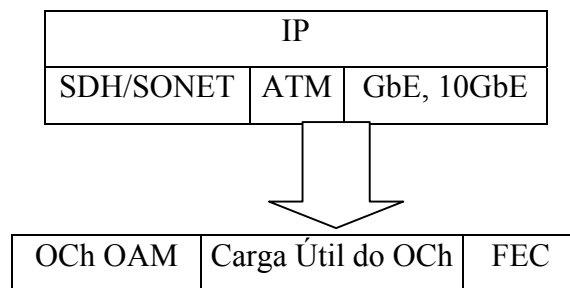


Fig. 3.6 – Estrutura de um *digital wrapper*.

3.7 – Arquiteturas de Redes Ópticas

A camada óptica é a principal camada de transmissão para os *backbones* das redes de alta velocidade. A grande questão é sobre quais tecnologias usar sobre camada óptica para o fornecimento de serviços. As tecnologias explicadas nos itens anteriores; SDH/SONET, ATM, IP e MPLS; são as principais opções a serem utilizadas pelas operadoras para projetar suas redes de nova geração.

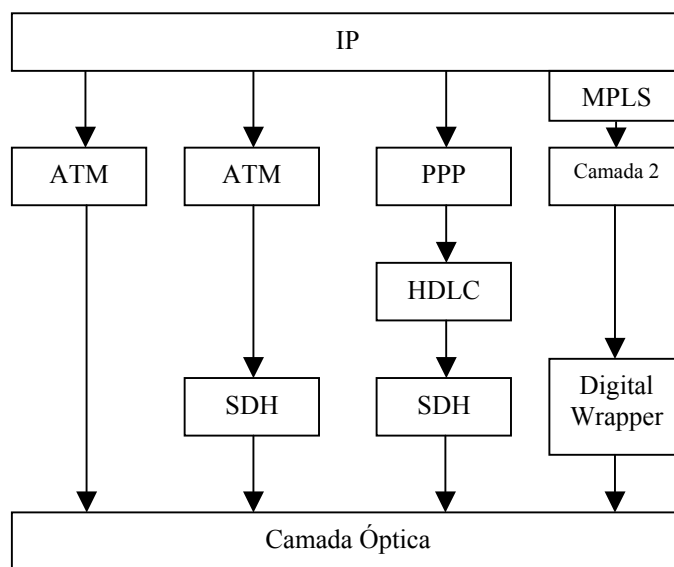


Fig. 3.7 – Arquiteturas possíveis para a integração IP/WDM. Evidentemente ao invés de SDH, pode-se utilizar o SONET.

A Fig. 3.7 mostra várias arquiteturas que possibilitam a integração entre as diversas redes clientes com a camada óptica, onde de uma maneira geral, pode-se referir como IP sobre WDM, pois o IP é a principal rede cliente, e camada óptica é uma rede WDM. As redes ópticas ainda terão que dar suporte aos serviços básicos oferecidos pelas PSTN

(*Public Switched Telephone Network*), pois a migração total dos serviços de telefonia fixa comutada para voz sobre IP ainda é bem futurista.

A primeira arquitetura (da esquerda para a direita) da Fig. 3.7 mostra o ATM como tecnologia básica no nível de enlaces de dados, formando um modelo em camadas IP sobre ATM. Mais especificamente, este modelo usa a AAL-5 para transportar os pacotes IP sobre uma rede ATM, assumindo que o ATM trabalha diretamente acima da camada óptica. A segunda arquitetura funciona de maneira similar, porém existe o SDH funcionando como rede de transporte acima da camada óptica, considerando o modelo de referência OSI, o SDH está situado na camada física (assim como a camada óptica).

A arquitetura seguinte pode ser vista como um método IP sobre SDH, onde os pacotes IP são enviados sobre quadros PPP e HDLC sobre enlaces SDH. A última arquitetura mostra um modelo onde o IP inclui funções da camada 2 devido o MPLS. Neste caso, os roteadores IP são diretamente conectados a equipamentos da camada óptica, onde o enquadramento da camada de enlace é realizado por cartões de interface dentro do roteador, onde usualmente é utilizado o SDH. Para este caso não são necessárias caixas SDH separadas na rede, o que ocasiona uma grande economia de custo. O *digital wrapper* pode ser também utilizado para permitir um maior controle da camada óptica além de aumentar a capacidade do canal em termos de BER devido à FEC.

O SDH/SONET ainda domina o núcleo da rede de transporte, porém esta tecnologia tende a migrar aos nós de borda da rede de transporte e serem utilizados para multiplexar linhas de circuitos comutados de velocidades mais baixas e levá-los à camada óptica [1].

O advento do MPLS, provendo QoS para o tráfego IP, tende a diminuir o uso do ATM como camada intermediária, podendo inclusive desaparecer no futuro [1].

3.7.1 Possível Arquitetura de um Nó da Rede Óptica

Em [20], o autor sugere uma possível arquitetura de um nó da rede óptica como sendo composta por dois componentes: comutador de roteamento de comprimento de onda (*wavelength routing switch* - WRS) e estação de acesso. O WRS é responsável pelo roteamento de comprimentos de onda e multiplexação/demultiplexação de comprimentos de onda. A estação de acesso é responsável por inserção e derivação local de tráfegos e funções de *grooming*. O WRS é composto de OXC, unidade de controle e gerenciamento

de rede (NC&M) e multiplexadores/demultiplexadores ópticos. Em um NC&M, uma interface rede-rede (NNI) pode configurar o OXC e trocar mensagens de controle com outros nós num comprimento de onda dedicado (mostrado como comprimento de onda 0 na Fig. 3.8). Uma interface rede-usuário (NUI) se comunicará com a NNI e trocará informações de controle com a interface usuário-rede (UNI), que é o componente de controle da estação de acesso. O OXC provê a funcionalidade da comutação do comprimento de onda.

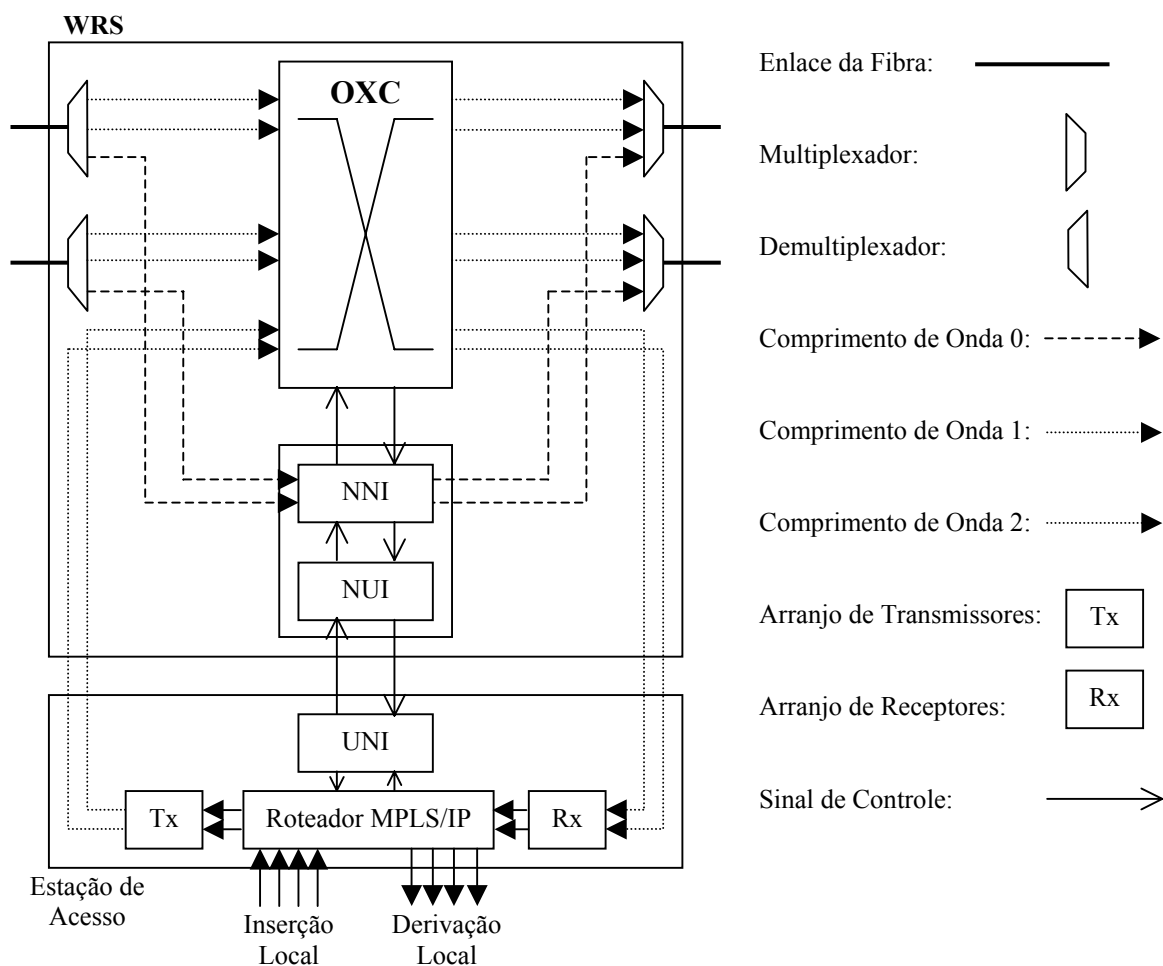


Fig. 3.8 – Possível Arquitetura de um Nó em uma Rede Óptica [20].

Na Fig. 3.8, cada estação de acesso está equipada com alguns transmissores e receptores (transceptores). O tráfego originado da estação de acesso é enviado como um sinal óptico em um comprimento de onda pelo transmissor. O tráfego destinado à estação

de acesso é convertido do domínio óptico para o elétrico pelo receptor. Uma rede WDM poderá utilizar tanto transceptores sintonizáveis quanto fixos.

A estação de acesso da Fig.3.8 provê a capacidade de provisão de largura de banda flexível e baseada em software à rede. A multiplexação de conexões de baixa velocidade em caminhos ópticos de alta capacidade é feita pelo roteador MPLS/IP utilizando um esquema de filas baseado em software. A tecnologia SDH/SONET pode também ser utilizada nas estações de acesso para prover a capacidade de multiplexação e demultiplexação rápida de tal forma a prover uma plataforma multi-serviço de acesso ao OXC na rede de uma operadora.

Esta alternativa só é possível porque o canal dedicado de troca de mensagens de controle, isto é, o canal de supervisão óptica (OSC) é demultiplexado e vai direto ao componente de controle composto pelo NNI e NUI, pois o OXC “olha” apenas a camada de canal óptico.

Uma outra opção é ao invés de utilizar um OSC para troca de mensagens de controle, é utilizar *digital wrapper*, pois ele é muito útil para equipamentos que só “olham” a camada de canal óptico e não processam as camadas de seção de multiplexação e de transmissão como o OXC. Porém, esta opção só está disponível em locais onde o caminho óptico é processado no domínio elétrico, isto é, locais com regeneradores ou transponders [1].

CAPÍTULO 4 – Projeto de Redes Translúcidas de Longa Distância

Uma rede óptica é transparente quando não existe regeneração eletrônica dos caminhos ópticos durante o seu percurso fim-a-fim, enquanto uma rede óptica é opaca quando cada caminho óptico é regenerado em todos os nós pelo qual transita na rede. Uma rede óptica transparente não tem apenas restrições severas relacionadas com degradações acumuladas, mas também com monitoração de performance, isolamento de falhas, gerenciamento centralizado, continuidade de comprimento de onda entre outras [26]. O principal inconveniente das redes opacas é o seu alto custo. Usando redes ópticas translúcidas, é possível alcançar uma performance muito próxima aos das redes opacas em termos de bloqueio de novas requisições e BER, porém com grande economia nos custos, e menos complexidade do que uma rede completamente óptica. Em suma, redes translúcidas oferecem o melhor dos domínios ópticos e eletrônicos sem comprometer as principais características de cada uma dessas tecnologias [26].

O problema de projetar redes translúcidas de longa distância se enquadra no mesmo modelo para projetar uma rede de roteamento de comprimentos de onda, porém têm que ser levadas em consideração as restrições da camada física. Neste capítulo serão apresentadas três estratégias de tal projeto para diferentes topologias de rede. A primeira estratégia utiliza a tradicional abordagem de primeiro resolver o problema de projeto de caminhos ópticos (LTD) para depois resolver o problema de alocação e roteamento de comprimento de onda (RWA). A estratégia seguinte considera que a matriz de tráfego é dada em função de caminhos ópticos, logo o LTD já está resolvido, faltando apenas resolver o RWA. A última estratégia utiliza o conceito de ilhas de transparência, onde se tem que definir os nós *hubs* e seus domínios de transparência.

O aspecto chave em projetar uma rede de roteamento de comprimentos de onda é determinar o número e o conjunto de comprimentos de onda que devem ser estabelecidos em cada enlace WDM. Isto é conhecido como o problema de dimensionamento de comprimentos de onda [1].

Este capítulo tem o intuito de apresentar diferentes abordagens para projetar redes translúcidas de longa distância de uma maneira apropriada no projeto das primeiras redes

ópticas de nova-geração, onde equipamentos novos como *all-optical* OXC terão que coexistir com equipamentos legados como caixas SDH/SONET. Outras estratégias para projetar redes translúcidas de longa distância foram propostas em [27]-[30].

4.1 – Os Problemas de LTD e RWA

Pode-se resolver o problema de LTD e RWA em conjunto, mas isto é muito complexo. Por isso, será adotada a heurística de resolvê-los em separado, o que fornece uma solução sub-ótima.

Atualmente, na maioria das situações práticas, a rede é projetada para dar suporte a uma determinada matriz de tráfego fixa. A matriz de tráfego pode estar em função de caminhos ópticos ou tráfego de camadas superiores (IP, SDH). No primeiro caso apenas o RWA precisa ser resolvido, enquanto no segundo caso, tanto o LTD quanto o RWA devem ser resolvidos. Vale salientar que para o segundo caso considerando tráfego SDH, o LTD deve ser resolvido somente se o tráfego entre nós consistir de um número razoável de tais circuitos, caso este não seja o problema, então somente a aplicação do RWA é necessária.

A Fig. 4.1 mostra o resumo dos passos para projetar uma rede óptica utilizando o LTD e o RWA.

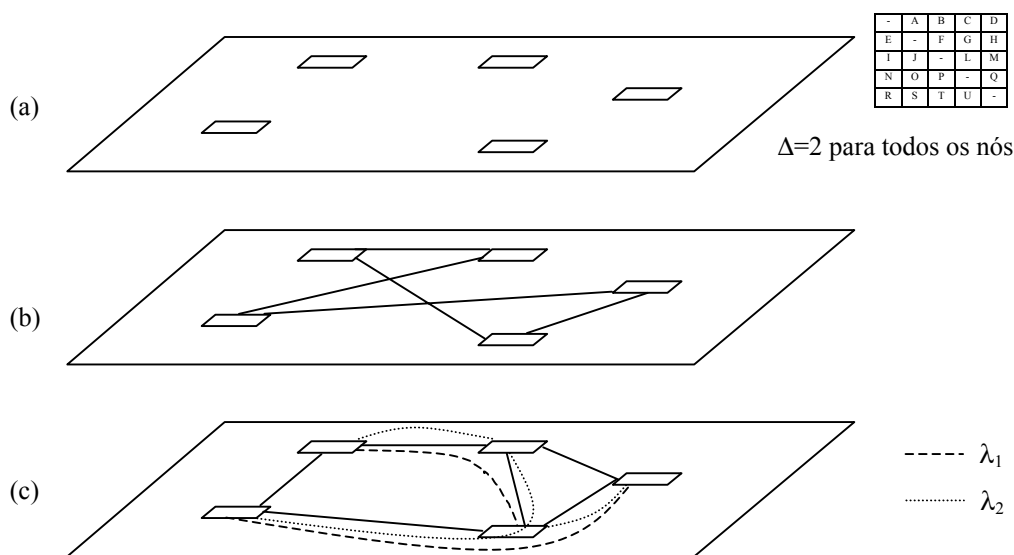


Fig. 4.1 – Passos de projeto: (a) Resolve-se o LTD, para isto, são conhecidos a matriz de tráfego e o número de portas de entrada e saída que cada nó possui (Δ), não sendo importante se preocupar com a topologia física da rede. (b) A solução do LTD mostrará as conexões que devem ser estabelecidas na rede óptica. (c) A rota e o comprimento de onda associados à cada conexão da solução do LTD serão determinados pelo RWA.

4.1.1 – LTD (*Lightpath Topology Design*)

O problema de projeto de topologia de caminhos ópticos (LTD) pode ser formulado como um problema de programação linear inteira mista (MILP) que visa estabelecer as melhores conexões entre nós a partir de uma demanda de tráfego de camadas superiores (SDH, IP) de modo a satisfazer determinado objetivo como, por exemplo, minimizar o congestionamento na rede. A solução do LTD gera caminhos ópticos que devem ser estabelecidos pela topologia física da rede e representa a topologia vista pelas camadas superiores.

A presente formulação terá como entradas a matriz de tráfego e o número de portos (ou portas) IP de entrada e saída que cada nó possui. A matriz de tráfego considera o modelo estatístico de Poisson e representa a taxa média de chegada de pacotes (pacotes/segundo) vezes o tamanho médio do pacote (bits/pacote), normalizado pela taxa de transmissão do enlace. O número de portos IP que cada roteador possui é considerado como sendo Δ , que é o número máximo de conexões entrando ou saindo de um nó. Nesta modelagem é possível estabelecer Q caminhos ópticos entre um par origem-destino. A função objetivo é minimizar o fluxo máximo, isto é, o fluxo do caminho óptico de maior fluxo da rede; este fluxo máximo é conhecido como congestionamento da rede. Vários trabalhos foram desenvolvidos para resolver o problema de LTD, e maiores detalhes sobre variações desta formulação e vários métodos heurísticos para sua solução podem ser encontrados em [31]-[34].

Função Objetivo: minimizar o congestionamento da rede.

$$\text{Minimizar } \lambda_{\max} \quad (4.1)$$

Restrições:

Conservação de fluxo em cada nó: a equação abaixo é a conservação de fluxo em cada nó para o tráfego entre os nós s e d. $\lambda_{i,j,q}^{s,d}$ representa o tráfego de nó origem s e destino d, que passa pelo q-ésimo caminho óptico (i, j).

$$\sum_q \sum_j \lambda_{i,j,q}^{s,d} - \sum_q \sum_j \lambda_{j,i,q}^{s,d} = \begin{cases} \lambda^{s,d} & \text{se } s = i, \\ -\lambda^{s,d} & \text{se } d = i, \\ 0 & \text{se } c.c., \end{cases} \quad \forall s, d, i \quad (4.2)$$

Fluxo total em um enlace lógico: as equações 4.3 e 4.4, asseguram que a carga em qualquer caminho óptico não é maior do que a carga máxima λ_{\max} , no qual está sendo minimizada. A equação 4.5 garante que o fluxo de cada caminho óptico é menor que a taxa de transmissão da linha óptica. A equação 4.6 assegura que a variável $\lambda_{i,j,q}^{s,d}$ pode ter um valor diferente de zero se existir o caminho óptico (i,j,q) entre o par origem-destino ($b_{q(i,j)} \neq 0$). O tráfego no caminho óptico (i,j,q) entre o par origem-destino (s,d) é limitado superiormente pelo fluxo total do tráfego $\lambda^{s,d}$ entre (s,d).

$$\lambda_{i,j,q} = \sum_{s,d} \lambda_{i,j,q}^{s,d} \quad , \quad \forall i, j, q \quad (4.3)$$

$$\lambda_{i,j,q} \leq \lambda_{\max} \quad , \quad \forall i, j, q \quad (4.4)$$

$$\lambda_{i,j,q} < 1 \quad , \quad \forall i, j, q \quad (4.5)$$

$$\lambda_{i,j,q}^{s,d} \leq b_{q(i,j)} \lambda^{s,d} \quad , \quad \forall i, j, s, d, q \quad (4.6)$$

Restrições de Grau: a restrição de grau assegura que a topologia projetada tem no máximo Δ caminhos ópticos entrando e saindo de cada nó.

$$\sum_{q=1}^Q \sum_i b_{q(i,j)} \leq \Delta \quad , \quad \forall j \quad (4.7)$$

$$\sum_{q=1}^Q \sum_j b_{q(i,j)} \leq \Delta \quad , \quad \forall i \quad (4.8)$$

Restrição de Caminho Óptico Bidirecional: esta restrição assegura que a topologia projetada possui apenas caminhos ópticos bi-direcionais, isto é, se existe um q-ésimo caminho óptico do nó i para o nó j, existe também um q-ésimo caminho óptico do nó j para o nó i.

$$b_{q(i,j)} = b_{q(j,i)} \quad , \quad \forall i, j, q \quad (4.9)$$

Restrições de Não-Negatividade e Número Inteiro: as restrições abaixo define a variável $b_{q(i,j)}$ como sendo binária e as outras como sendo reais não-negativas. Logo tal projeto representa um problema de programação linear inteira mista (MILP).

$$\lambda_{i,j,q}^{s,d}, \lambda_{q(i,j)}, \lambda_{\max} \geq 0 \quad , \quad \forall i, j, s, d, q \quad (4.10)$$

$$b_{q(i,j)} \in \{0,1\} \quad , \quad \forall i, j \quad (4.11)$$

Os valores de interesse da solução do LTD são os caminhos ópticos $b_{q(i,j)}$. De posse deles aplica-se o RWA para rotear e alocar comprimentos de onda aos caminhos ópticos a serem estabelecidos.

4.1.2 RWA (*Routing and Wavelength Assignment*)

O problema de roteamento e alocação de comprimentos de onda (RWA) busca a solução de dada topologia de rede com um dado conjunto de requisições de caminhos ópticos fim-a-fim, determinando a rota e o comprimento de onda para estas requisições, usando por exemplo, o menor número possível de comprimentos de onda.

Esta solução de RWA que determina um conjunto específico de comprimentos de onda que deve ser providos em cada enlace para estabelecer a topologia de caminhos ópticos requerida, é o problema de RWA *offline*, já que são dados todos os caminhos ópticos de uma única vez, e é muito útil no estágio de planejamento da rede. Quando a rede estiver operacional, o problema de RWA tem que ser resolvido para cada caminho óptico individualmente, quando estes forem requeridos para serem estabelecidos. Este é o problema de RWA *online*.

Existem vários métodos heurísticos para a solução do RWA *offline*, estes métodos são aplicados pois a solução através programação linear (que fornece uma solução ótima) é um problema NP-difícil. Porém escolhendo uma função objetivo simples, o número de iterações e conseqüentemente o tempo para achar uma solução ótima, não se tornam proibitivos (pelo menos para redes não muito grandes nem altamente conectadas).

Mais especificamente, este é um problema de programação linear inteira, pois todas as variáveis possuem valores inteiros, e a função objetivo é tal, que busca minimizar a somatória das distâncias de todos os caminhos ópticos, satisfazendo uma série de restrições, como continuidade de comprimento de onda através dos enlaces e de *clash* (não mais do

que 1 caminho óptico pode usar um determinado comprimento de onda em um enlace específico em cada fibra) entre outras. Minimizando a distância de todos os caminhos ópticos, está-se indiretamente minimizando “a grosso modo” o número de regeneradores que são necessários para o estabelecimento de todos os caminhos ópticos da rede com uma certa BER.

A formulação matemática feita em programação linear inteira para o dimensionamento de redes de roteamento de comprimento de onda é mostrada a seguir onde cada conexão origem-destino é equivalente a um caminho óptico, logo se está considerando uma rede *single-hop*. A granularidade do problema é o comprimento de onda.

Função Objetivo: minimizar a somatória das distâncias de todos os caminhos ópticos. O parâmetro $c_{i,j}$ representa a distância (isto é, o custo) de cada enlace (i,j) percorrido por cada caminho óptico, e $W_{s,d,w}^{i,j,f} = 1$ se o caminho óptico de origem s e destino d passa pelo enlace (i,j) , utilizando a fibra f e o comprimento de onda w , $W_{s,d,w}^{i,j,f} = 0$ caso contrário.

$$\text{Minimizar } \sum_{s,d} \sum_{i,j} \sum_w \sum_f W_{s,d,w}^{i,j,f} \times c_{i,j} \quad (4.12)$$

Restrições:

Estabelecimento de Caminhos Ópticos: a equação 4.13 assegura que todos os caminhos ópticos são estabelecidos.

$$W_{s,d} = 1 \quad , \quad \forall(s,d) \quad (4.13)$$

Único Comprimento de Onda: esta restrição garante que somente um comprimento de onda é associado a cada caminho óptico.

$$W_{s,d} = \sum_{w=1}^N W_{s,d,w} \quad , \quad \forall(s,d) \quad (4.14)$$

Restrição de Continuidade de Comprimento de Onda: a equação 4.15 representa a continuidade de comprimento de onda.

$$W_{s,d,w}^{i,j,f} \leq W_{s,d,w} \quad , \quad \forall(s,d), (i,j), w, f \quad (4.15)$$

Restrição de Clash: esta restrição assegura que no máximo um caminho óptico atravessando um enlace i-j e fibra f pode receber um determinado comprimento de onda.

$$\sum_{s,d} W_{s,d,w}^{i,j,f} \leq 1, \quad \forall(i,j), w, f \quad (4.16)$$

Restrição de Conservação de Comprimento de Onda: esta restrição garante que o comprimento de onda é mantido em todos os nós no qual o caminho óptico $W_{s,d}$ passa. Esta restrição é análoga a conservação de fluxo em cada nó utilizada no LTD.

$$\sum_{w=1}^N \sum_j \sum_{f=1}^F W_{s,d,w}^{i,j,f} - \sum_{w=1}^N \sum_k \sum_{f=1}^F W_{s,d,w}^{k,i,f} = \begin{cases} W_{s,d} & \text{se } s=i \\ -W_{s,d} & \text{se } d=i \\ 0 & \text{se } c.c \end{cases}, \quad \forall(s,d), i \quad (4.17)$$

Restrição de Carga: a restrição abaixo implica que no máximo $L_{i,j}$ comprimentos de onda podem atravessar cada fibra f, no enlace i-j.

$$\sum_{s,d} \sum_w W_{s,d,w}^{i,j,f} \leq L_{i,j}, \quad \forall(i,j), f \quad (4.18)$$

Equipamentos para conversão de comprimentos de onda já ultrapassaram os limites dos laboratórios (conversão totalmente óptica ainda não é utilizado comercialmente), porém ainda é uma solução muito cara para melhorar a eficiência na utilização de comprimentos de onda. Depois de ser regenerado, é completamente factível associar um λ_j à um determinado caminho óptico que tenha ingressado no regenerador com um λ_i . Porém, como em uma rede com P pares de fibras entre nós e W comprimentos de onda em cada fibra sem nenhum tipo de conversão de λ é equivalente a uma rede com um par de fibra com PW comprimentos de onda, e grau de conversão P nos nós, além do que a conservação de λ facilita a parte operacional do sistema, e a maior parte das fibras instaladas ainda estão escuras, a capacidade de conversão de comprimento de onda em uma rede óptica não é um atributo fundamental no presente estado da arte e provavelmente nem nas primeiras redes ópticas de nova geração. Em [35], o autor trata do problema da conversão e comprimentos de onda nos nós.

Pelo motivo acima, e para simplificar o problema, será considerado que cada enlace possui somente um par de fibras bidirecionais (isto é, $F = 1$), e nenhum tipo de conversão de comprimento de onda será realizado. Será considerado também, que todas as fibras suportam o mesmo número $L_{i,j}$ de comprimentos de onda, que será generalizado por um valor N .

4.2 – Projeto de Uma Rede Hipotética Brasileira de Ultra Longa Distância

Para este caso será estudado um possível projeto considerando uma rede hipotética brasileira de 12 nós, representada na Fig. 4.2, onde cada nó corresponde a um dos Estados mais economicamente ativos do Brasil [34]. A distância entre os nós foi adotada e aproximada para múltiplos de 100 km entre as capitais destes estados.

Para tal projeto será considerada a utilização de equipamentos ópticos de ultra longa distância que são capazes de estabelecer caminhos ópticos da ordem de até 4000 km sem necessitar regeneração. Como para estabelecer um caminho fim-a-fim, um sinal (circuito SDH, pacote IP etc) pode ter que passar por diferentes caminhos ópticos, de tal forma que necessariamente será regenerado nestes nós de interconexão (p. ex.: através de *grooming*, entrando numa fila do roteador etc) não se está preocupado em colocar regeneradores espalhados pela rede para este caso, pois nos nós já ocorrem conversão O-E-O de alguns caminhos ópticos.

O primeiro passo deste projeto é resolver o LTD, para isto está-se considerando que a matriz de tráfego é dada em função do tráfego IP entre cada par de nós, e que existe assimetria entre estes tráfegos bidirecionais. A matriz de tráfego está representada na Tab. 4.1, e representa a média estatística de tráfego normalizado pela taxa de transmissão da linha (por exemplo, 2,5 Gbps), esta matriz foi gerada a partir da geração de números aleatórios entre 0 e 0,3 (considerando a taxa de 2,5 Gbps, representa um tráfego médio de 0 até 0,75 Gbps) com uma distribuição uniforme. Ainda é possível o estabelecimento de 2 caminhos ópticos entre cada par origem-destino ($Q = 2$). Busca-se minimizar o congestionamento da rede. Vários valores para o congestionamento foram calculados a partir da variação do número Δ de portos IP de cada roteador (nó).

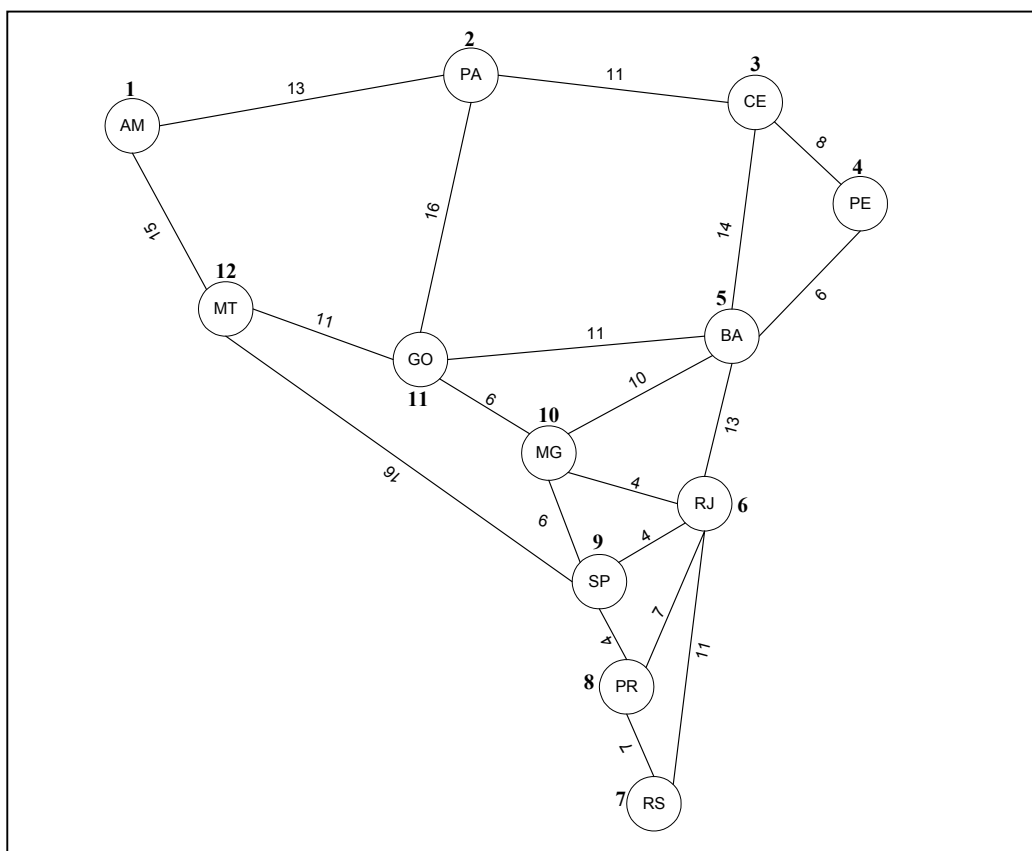


Fig. 4.2 – Rede Hipotética Brasileira [34]. Os números em negrito representam o número do nó.

| s,d | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | - | 0,22 | 0,28 | 0,08 | 0,03 | 0,01 | 0,24 | 0,15 | 0,17 | 0,08 | 0,1 | 0,07 |
| 2 | 0,08 | - | 0,02 | 0,29 | 0,01 | 0,05 | 0,08 | 0,14 | 0,08 | 0,01 | 0,08 | 0,18 |
| 3 | 0,09 | 0,18 | - | 0,06 | 0,29 | 0,28 | 0,15 | 0,03 | 0,15 | 0,20 | 0,17 | 0,28 |
| 4 | 0,10 | 0,13 | 0,22 | - | 0,14 | 0,23 | 0,1 | 0,29 | 0,14 | 0,03 | 0,04 | 0,01 |
| 5 | 0,18 | 0,75 | 0,06 | 0,08 | - | 0,24 | 0,18 | 0,17 | 0,27 | 0,26 | 0,18 | 0,16 |
| 6 | 0,07 | 0,27 | 0,27 | 0,12 | 0,24 | - | 0,09 | 0,23 | 0,23 | 0,27 | 0,24 | 0,20 |
| 7 | 0,27 | 0,26 | 0,22 | 0,11 | 0,14 | 0,04 | - | 0,29 | 0,09 | 0,28 | 0,05 | 0,26 |
| 8 | 0,24 | 0,11 | 0,17 | 0,02 | 0,26 | 0,02 | 0,17 | - | 0,13 | 0,05 | 0,29 | 0,1 |
| 9 | 0,18 | 0,21 | 0,26 | 0,14 | 0,02 | 0,07 | 0,29 | 0,26 | - | 0,12 | 0,15 | 0,05 |
| 10 | 0,16 | 0,16 | 0,27 | 0,2 | 0,15 | 0,23 | 0,29 | 0,23 | 0,09 | - | 0,18 | 0,19 |
| 11 | 0,16 | 0,09 | 0,27 | 0,1 | 0,11 | 0,23 | 0,05 | 0,08 | 0,14 | 0,26 | - | 0,22 |
| 12 | 0,08 | 0,21 | 0,19 | 0,02 | 0,16 | 0,07 | 0,11 | 0,13 | 0,28 | 0,20 | 0,08 | - |

Tab. 4.1 – Matriz de tráfego para a rede hipotética brasileira.

A solução do LTD para uma rede grande utilizando MILP é impraticável devido ao tempo de solução, para uma rede média com 12 nós como o caso presente ainda assim é proibitivo, fazendo a necessidade da utilização de métodos heurísticos, onde os mais simples são, relaxar as variáveis binárias $b_{q(i,j)}$ tornando-as números reais entre $[0, 1]$, ou simplesmente executar o programa por um certo período, e trabalhar com os resultados obtidos com este intervalo de tempo. Para a solução do LTD utilizou-se esta última heurística com tempo de execução médio de 72 horas, num PC Pentium 4, 1,5 GHz e 256 Megabytes de memória RAM. Para a solução do LTD (e do RWA também) utilizou-se o AMPL/CPLEX.

A Fig. 4.3 mostra os valores de congestionamento para diferentes valores de portos IP de cada roteador, encontrados a partir de uma solução sub-ótima do LTD.

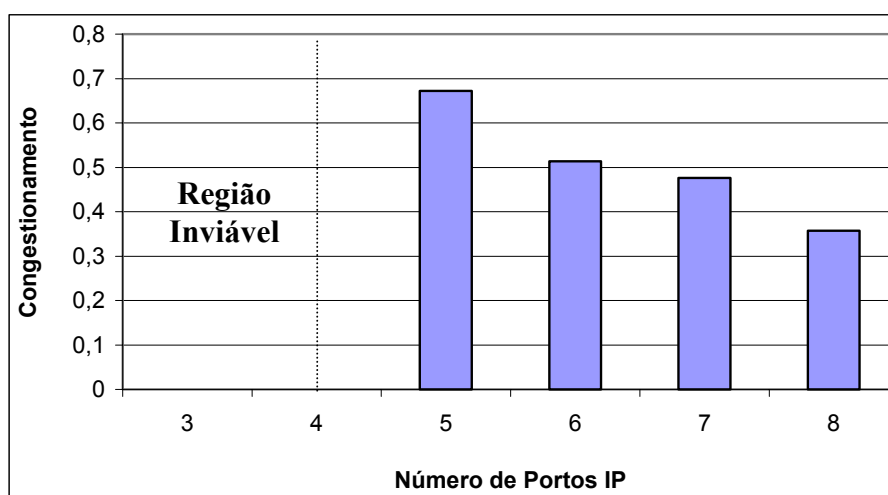


Fig. 4.3 – Valores de congestionamento em função do número de portos.

Considerando que no projeto cada roteador possui grau lógico 8, isto é, o número de portos é 8, encontra-se os seguintes valores para $b_{1(i,j)}$ e $b_{2(i,j)}$ mostrados na Tab. 4.2 e 4.3 respectivamente.

| $b_{1(i,j)}$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|--------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| 1 | - | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | - | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 4 | 1 | 0 | 1 | - | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 1 | 1 | - | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | - | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | - | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | - | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 9 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 1 |
| 10 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | - | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | - | 1 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | - |

Tab. 4.2 : Valores de $b_{1(i,j)}$ encontrados com a resolução do LTD.

| $b_{2(i,j)}$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|--------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| 1 | - | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | - | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 1 | 1 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 4 | 0 | 1 | 0 | - | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | - | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 6 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | - | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 9 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | - | 0 | 0 | 1 |
| 10 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 1 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | - | 1 |
| 12 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | - |

Tab. 4.3 : Valores de $b_{2(i,j)}$ encontrados com a resolução do LTD.

Os valores dos $b_{q(i,j)}$ são as entradas para a resolução do RWA, onde as Tab. 4.2 e 4.3 representam os caminhos ópticos a serem estabelecidos através de uma determinada rota utilizando um certo comprimento de onda. A Tab. 4.4 sumariza as duas tabelas anteriores através da matriz de tráfego.

| # do Nó | Nome do Nó | Nó destino | | | | | | | | | | | |
|---------|------------------|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | Amazonas | - | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 2 | Pará | 0 | - | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 3 | Ceará | 1 | 1 | - | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 4 | Pernambuco | 1 | 1 | 1 | - | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 5 | Bahia | 0 | 1 | 1 | 1 | - | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 6 | Rio de Janeiro | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | - | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | R. Grande do Sul | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | - | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 8 | Paraná | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | - | 1 | 0 | 2 | 1 |
| 9 | São Paulo | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | - | 0 | 0 | 2 |
| 10 | Minas Gerais | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | - | 0 | 1 |
| 11 | Goiás | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | - | 2 |
| 12 | Mato Grosso | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 2 | - |

Tab. 4.4 – Matriz de Tráfego utilizada para resolver o RWA.

Resolvendo o RWA chega-se a conclusão que o número mínimo de comprimentos de onda para estabelecer todos os caminhos ópticos é 7λ 's, e a partir de 10λ 's todos os caminhos ópticos são estabelecidos utilizando o menor caminho, como é visto na Fig. 4.4.

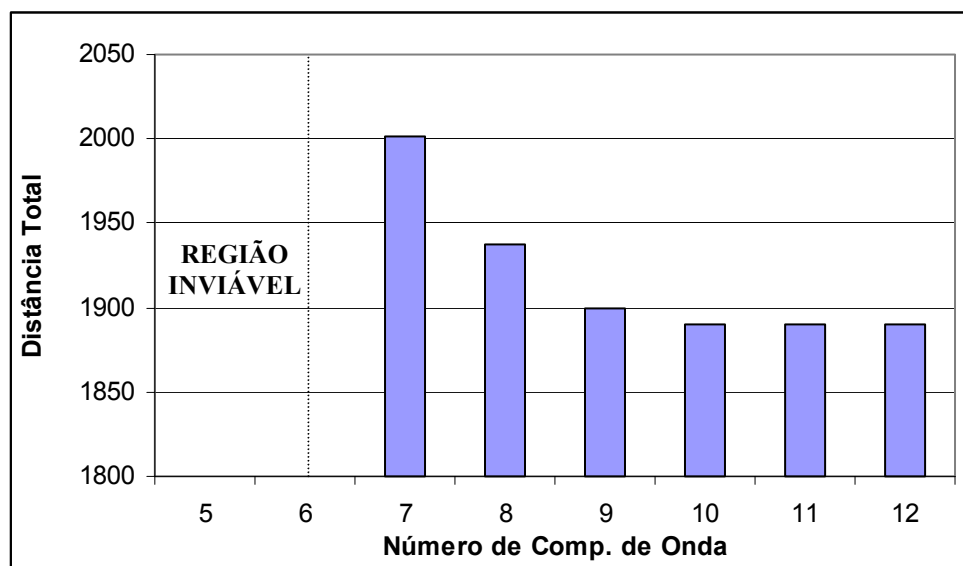


Fig. 4.4 – Somatória da distância de todos os caminhos ópticos.

A Tab. 4.5 mostra somente uma parte da solução do RWA para 10λ 's, pois uma tabela completa seria muito grande.

| S | D | Wavelength | Caminho | Distância |
|----------|----------|-------------------|----------------|------------------|
| 1 | 4 | 10 | 1-2-3-4 | 32 |
| 1 | 7 | 4 | 1-12-9-8-7 | 42 |
| 1 | 9 | 1 | 1-12-9 | 31 |
| 2 | 6 | 7 | 2-11-10-6 | 26 |
| 2 | 7 | 8 | 2-11-10-6-7 | 37 |
| 2 | 9 | 2 | 2-11-10-9 | 28 |
| 2 | 10 | 10 | 2-11-10 | 22 |
| 3 | 4 | 1 | 3-4 | 8 |
| 3 | 5 | 6 | 3-5 | 14 |
| 3 | 7 | 10 | 3-5-6-7 | 38 |
| 3 | 11 | 2 | 3-5-11 | 25 |
| 4 | 1 | 2 | 4-3-2-1 | 32 |
| 4 | 3 | 5 | 4-3 | 8 |
| 4 | 5 | 5 | 4-5 | 6 |
| 4 | 9 | 7 | 4-5-10-9 | 22 |
| 5 | 3 | 9 | 5-3 | 14 |
| 5 | 4 | 6 | 5-4 | 6 |
| 5 | 7 | 4 | 5-6-7 | 24 |
| 5 | 8 | 9 | 5-6-8 | 20 |
| 5 | 10 | 6 | 5-10 | 11 |
| 6 | 2 | 7 | 6-10-11-2 | 26 |
| 6 | 7 | 3 | 6-7 | 11 |
| 6 | 11 | 2 | 6-10-11 | 10 |
| 6 | 12 | 6 | 6-9-12 | 20 |
| 7 | 1 | 4 | 7-8-9-12-1 | 42 |
| 7 | 2 | 5 | 7-6-10-11-2 | 37 |
| 7 | 3 | 8 | 7-6-5-3 | 38 |

Tab. 4.5 – Rota e comprimento de onda alocado para alguns dos caminhos ópticos. A coluna das distâncias representa múltiplos de 100 km.

É interessante notar que alguns caminhos ópticos possuem mais de 4000 km, como por exemplo o caminho óptico 1-7, que possui 4200 km. Mesmo utilizando transmissão solitônica esta distância é difícil de ser alcançada pois este caminho óptico não é ponto-a-ponto, e terá que atravessar alguns nós, consequentemente alguns OXC, de tal forma que o sinal sofrerá mais degradações do que teria se fosse ponto-a-ponto.

4.3 – Projeto de Uma Rede Hipotética de Longa Distância na Região Sudeste

Neste caso será apresentado um possível projeto considerando uma rede hipotética de longa distância de 8 nós, representada na Fig. 4.5, onde os nós correspondem às capitais da região sudeste do Brasil, mais algumas cidades importantes do estado de São Paulo. A distância entre os nós foi adotada e aproximada para múltiplos de 100 km entre os nós.

O interesse inicial é o estabelecimento de caminhos ópticos originados de uma dada matriz fixa utilizando o menor número possível de regeneradores e comprimentos de onda. Isto é uma maneira de minimizar os custos, já que regeneradores correspondem a grande parte dos custos dos nós.

Considerando que tal rede esteja operacional, novas requisições de caminhos podem chegar, por isso será mostrado um método para resolver o problema do RWA *Online*.

Para tal projeto será considerado que é possível estabelecer caminhos ópticos de no máximo 800 km de comprimento (8 *spans*), caso seja ponto-a-ponto (ver item 2.14), e de no máximo 700 km caso passe por nós intermediários. Valores altos assim utilizando a tecnologia IM-DD são possíveis utilizando por exemplo, códigos corretores de erro como o *Reed-Solomon* (239,255).

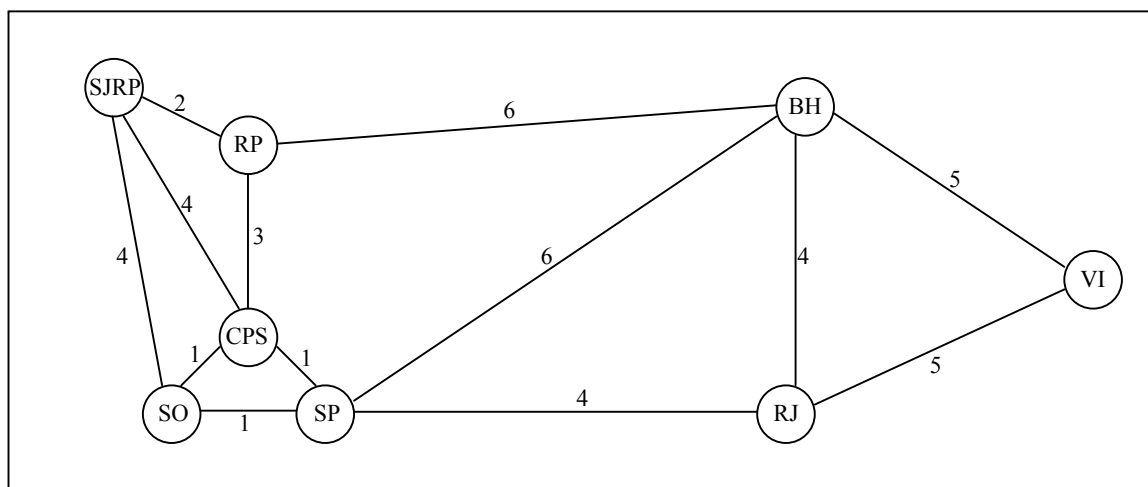


Fig. 4.5: Uma rede de longa distância com 8 nós. Os números nos enlaces representam a distância em múltiplos de 100 km entre os nós.

4.3.1 – Resolução do RWA *Offline*

A seguir é mostrada uma possível matriz de tráfego (caminhos ópticos), a partir da qual, deseja-se resolver o problema de RWA *offline*.

| # do Nó | Nome do Nó | Nó destino | | | | | | | | Tráfego Total |
|---------|-------------------|------------|---|---|---|---|---|---|---|---------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 1 | S. J do Rio Preto | - | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 7 |
| 2 | Ribeirão Preto | 0 | - | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 7 |
| 3 | Campinas | 0 | 0 | - | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 9 |
| 4 | São Paulo | 0 | 0 | 0 | - | 1 | 3 | 1 | 3 | 13 |
| 5 | Sorocaba | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 1 | 1 | 1 | 7 |
| 6 | Belo Horizonte | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 1 | 3 | 11 |
| 7 | Vitória | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 1 | 7 |
| 8 | Rio de Janeiro | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 11 |

Tab. 4.6 – Matriz de tráfego da rede hipotética do sudeste. O tráfego é bidirecional e simétrico e está mostrado em termos de caminhos ópticos de 10 Gbps no triângulo superior direito desta matriz.

Para achar o menor conjunto de comprimentos de onda que satisfaçam todas as restrições do RWA *offline*, e minimizar o número de regeneradores utilizados, aplica-se o seguinte algoritmo:

- 1 – Repetir os passos seguintes até convergir o número de regeneradores utilizados no sistema.
- 2 – Achar o menor conjunto de comprimentos de onda W , que deixa o problema factível.
- 3 – Determinar o número de regeneradores que são necessários com W λ 's.
- 4 – Acrescentar 1 ao valor de W , e voltar a 3.

O valor final de W , representará o conjunto de comprimentos de ondas (1, 2, .., W) que serão alocados entre todos os caminhos ópticos a serem estabelecidos pelo método *offline*.

Dois casos serão mostrados a seguir, o primeiro considerando que tem-se um conjunto de 7 λ 's para estabelecer todos os caminhos ópticos e o segundo tem-se um conjunto de 10 λ 's.

Caso 1: A Tab. 4.7 mostra uma solução para estabelecer caminhos ópticos de 10 Gbps (circuito STM-64) entre cada par s-d de acordo com a matriz de tráfego apresentada na Tab. 4.6, onde se tem 7 comprimentos de onda para serem alocados entre esses caminhos e o número máximo de spans que cada caminho óptico pode passar sem necessitar regeneração

é 8 caso não necessite passar por nós intermediários ou 7 caso contrário, mostrando também a localização dos regeneradores:

| S | D | Wavelength | Caminho | Distância | Regeneração |
|----------|----------|------------|----------------|-----------|-------------|
| 1 | 2 | 4 | 1-2 | 2 | |
| 1 | 3 | 1 | 1-3 | 4 | |
| 1 | 4 | 4 | 1-5-4 | 5 | |
| 1 | 5 | 1 | 1-5 | 4 | |
| 1 | 6 | 5 | 1-2-6 | 8 | 2 |
| 1 | 7 | 3 | 1-2-6-7 | 13 | 2, 6 |
| 1 | 8 | 6 | 1-5-4-8 | 9 | 4 |
| 2 | 3 | 3 | 2-3 | 3 | |
| 2 | 4 | 1 | 2-3-4 | 4 | |
| 2 | 5 | 2 | 2-3-5 | 4 | |
| 2 | 6 | 1 | 2-6 | 6 | |
| 2 | 7 | 2 | 2-6-7 | 11 | 6 |
| 2 | 8 | 6 | 2-6-8 | 10 | 6 |
| 3 | 4 | 3 | 3-4 | 1 | |
| 3 | 4 | 7 | 3-4 | 1 | |
| 3 | 4 | 2 | 3-4 | 1 | |
| 3 | 5 | 1 | 3-5 | 1 | |
| 3 | 6 | 6 | 3-4-6 | 7 | |
| 3 | 7 | 4 | 3-4-6-7 | 12 | 6 |
| 3 | 8 | 5 | 3-4-8 | 5 | |
| 4 | 5 | 1 | 4-5 | 1 | |
| 4 | 6 | 5 | 4-6 | 6 | |
| 4 | 6 | 2 | 4-6 | 6 | |
| 4 | 6 | 1 | 4-6 | 6 | |
| 4 | 7 | 4 | 4-8-7 | 9 | 8 |
| 4 | 8 | 3 | 4-8 | 4 | |
| 4 | 8 | 7 | 4-8 | 4 | |
| 4 | 8 | 2 | 4-8 | 4 | |
| 5 | 6 | 3 | 5-4-6 | 7 | |
| 5 | 7 | 7 | 5-4-6-7 | 12 | 6 |
| 5 | 8 | 1 | 5-4-8 | 5 | |
| 6 | 7 | 1 | 6-7 | 5 | |
| 6 | 8 | 3 | 6-8 | 4 | |
| 6 | 8 | 2 | 6-8 | 4 | |
| 6 | 8 | 1 | 6-8 | 4 | |
| 7 | 8 | 1 | 7-8 | 5 | |

Tab. 4.7 – Solução do RWA *offline* para 7 λ 's da rede hipotética do Sudeste.

Obs.: As linhas em negrito representam os caminhos ópticos que não utilizam o caminho mais curto, pois estariam violando as restrições da formulação matemática.

Caso 2: A Tab. 4.8 mostra uma solução para estabelecer caminhos ópticos de 10 Gbps (circuito STM-64) entre cada par s-d de acordo com a matriz de tráfego apresentada na Tab. 4.6, onde se tem 10 comprimentos de onda para serem alocados entre esses caminhos e o número máximo de spans que cada caminho óptico pode passar sem necessitar regeneração é 8 caso não necessite passar por nós intermediários ou 7 caso contrário:

| S | D | Wavelength | Caminho | Distância | Regeneração |
|----------|----------|-------------------|----------------|------------------|--------------------|
| 1 | 2 | 1 | 1-2 | 2 | |
| 1 | 3 | 1 | 1-3 | 4 | |
| 1 | 4 | 1 | 1-5-4 | 5 | |
| 1 | 5 | 3 | 1-5 | 4 | |
| 1 | 6 | 5 | 1-2-6 | 8 | 2 |
| 1 | 7 | 9 | 1-2-6-7 | 13 | 2, 6 |
| 1 | 8 | 8 | 1-3-4-8 | 9 | 4 |
| 2 | 3 | 8 | 2-3 | 3 | |
| 2 | 4 | 6 | 2-3-4 | 4 | |
| 2 | 5 | 1 | 2-3-5 | 4 | |
| 2 | 6 | 1 | 2-6 | 6 | |
| 2 | 7 | 8 | 2-6-7 | 11 | 6 |
| 2 | 8 | 5 | 2-3-4-8 | 8 | 4 |
| 3 | 4 | 7 | 3-4 | 1 | |
| 3 | 4 | 1 | 3-4 | 1 | |
| 3 | 4 | 2 | 3-4 | 1 | |
| 3 | 5 | 4 | 3-5 | 1 | |
| 3 | 6 | 10 | 3-4-6 | 7 | |
| 3 | 7 | 4 | 3-4-8-7 | 10 | 8 |
| 3 | 8 | 3 | 3-4-8 | 5 | |
| 4 | 5 | 1 | 4-5 | 1 | |
| 4 | 6 | 9 | 4-6 | 6 | |
| 4 | 6 | 2 | 4-6 | 6 | |
| 4 | 6 | 1 | 4-6 | 6 | |
| 4 | 7 | 1 | 4-8-7 | 9 | 8 |
| 4 | 8 | 9 | 4-8 | 4 | |
| 4 | 8 | 10 | 4-8 | 4 | |
| 4 | 8 | 7 | 4-8 | 4 | |

| | | | | | |
|---|---|---|---------|----|---|
| 5 | 6 | 7 | 5-4-6 | 7 | |
| 5 | 7 | 2 | 5-4-8-7 | 10 | 8 |
| 5 | 8 | 6 | 5-4-8 | 5 | |
| 6 | 7 | 1 | 6-7 | 5 | |
| 6 | 8 | 8 | 6-8 | 4 | |
| 6 | 8 | 6 | 6-8 | 4 | |
| 6 | 8 | 1 | 6-8 | 4 | |
| 7 | 8 | 1 | 7-8 | 5 | |

Tab. 4.8 – Solução do RWA *offline* para 10 λ 's da rede hipotética do Sudeste.

Como o tráfego é bidirecional, e para evitar escrever todas as conexões que representam conectividade total, foi tabelada a conexão apenas em um único sentido, pois as conexões no sentido oposto possuem a mesma rota e o mesmo comprimento de onda (isto não é necessário, mas por motivo de facilidade de operação é comumente empregado), por isso, a matriz de tráfego foi preenchida formando uma matriz triangular.

Como o objetivo é minimizar o número de regeneradores utilizando o menor número de comprimentos de onda, e como pode ser visto na Fig. 4.6, 7 λ 's é o menor número que torna o problema de RWA para a Tab.4.6 factível e que utiliza o menor número possível de comprimentos de onda. A solução com 10 λ 's é a melhor solução em relação a mínima distância percorrida por todos os caminhos ópticos, isto é, todos os caminhos ópticos são estabelecidos utilizando o menor caminho, porém ainda será necessário o mesmo número de regeneradores como mostra a Fig. 4.7. Logo a melhor solução para o problema é utilizar 7 λ 's. Logo nem sempre utilizar a menor distância para os caminhos ópticos é a melhor solução para redes ópticas, considerando apenas o custo da regeneração.

Tanto o valor da somatória da distância, quanto o valor do número de regeneradores, nas Fig. 4.6 e 4.7 consideram apenas um sentido, caso seja considerado o tráfego bidirecional, esses valores devem ser duplicados, isto é, para 7 λ 's são 394 unidades de distância (39.400 km) necessária para estabelecer todos os caminhos ópticos e com 18 regeneradores.

Obs.: O tempo de execução para chegar ao resultado do RWA *offline* para esta rede era de alguns minutos.

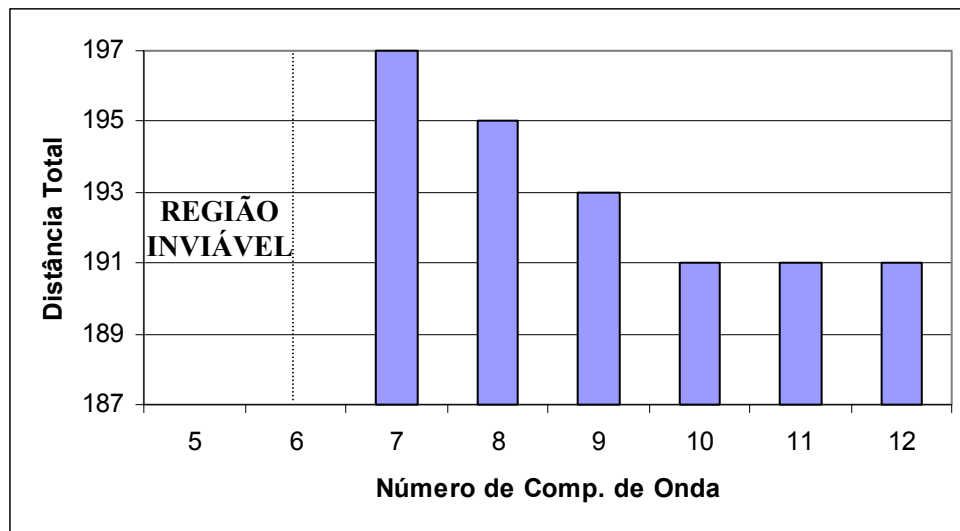


Fig. 4.6 – Somatória da distância de todos os caminhos ópticos (unidirecional) em função do número de λ 's.

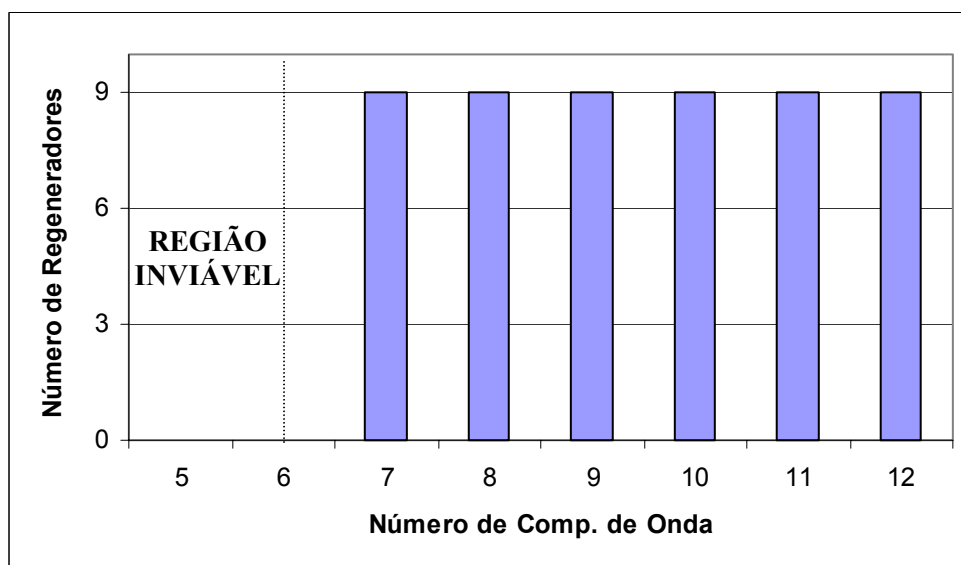


Fig. 4.7 – Número de regeneradores (apenas em uma direção) em função do número de λ 's.

4.3.2 Resolução do RWA *Online*

Considerando que a rede já está operacional, e que novas requisições chegam pedindo para estabelecer novos caminhos ópticos, pode-se adotar o seguinte procedimento para resolver este problema.

1 – Primeiramente, faz-se o roteamento baseado no algoritmo de Dijkstra, que o mesmo utilizado pelo protocolo OSPF largamente utilizado na Internet, onde se busca encontrar o menor caminho entre o nó origem e o nó destino.

2 – Depois com base na alocação de comprimentos de onda de prioridade fixa, se busca encontrar o primeiro comprimento de onda disponível em todos enlaces desde o nó origem até o destino.

Na primeira parte do problema, foi escolhida a implantação do sistema utilizando apenas 7 λ 's. Evidentemente, tem-se um sistema com W comprimentos de onda, onde somente 7 dos W λ 's estão sendo utilizados. Logo ainda há outros W-7 comprimentos de onda disponíveis, que poderão ser alocados assim que necessário. Para W = 16, ainda se terá 9 comprimentos de onda disponíveis, o que mostra que menos da metade da capacidade do sistema está sendo utilizando. Este número de 16 λ 's é um valor razoável para o sistema em questão (já são possíveis sistemas WDM com mais de 100 λ 's em uma única fibra), e utilizando o espaçamento de 100 GHz entre canais (aproximadamente 0,8 nm na 3ª janela), possibilita utilizar a região mais plana do EDFA que vai de aproximadamente 1545 nm até 1560 nm, o que facilita e muito o projeto de um equalizador.

Considerando que as seguintes requisições chegaram:

| S | D |
|----------|----------|
| 1 | 4 |
| 2 | 5 |
| 3 | 6 |
| 3 | 8 |
| 4 | 7 |

As seguintes rotas e respectivos comprimentos de onda serão:

| S | D | Wavelength | Caminho | Distância | Regeneração |
|----------|----------|-------------------|----------------|------------------|--------------------|
| 1 | 4 | 8 | 1-3-4 | 5 | |
| 2 | 5 | 4 | 2-3-5 | 4 | |
| 3 | 6 | 9 | 3-4-6 | 7 | |
| 3 | 8 | 10 | 3-4-8 | 5 | |
| 4 | 7 | 8 | 4-8-7 | 9 | 8 |

Para essas novas requisições, é necessária a alocação de novos comprimentos de onda, o λ_8 , λ_9 e λ_{10} , enquanto λ_4 pôde ser reutilizado. Também é necessária a utilização de mais um regenerador.

4.4 Projeto de Uma Rede Translúcida Utilizando Ilhas de Transparência

A topologia de rede da Fig. 4.8 tem como base a ANSP – *Academic Network at São Paulo*, onde foram inseridos alguns nós e enlaces extras (nós e enlaces tracejados), para tornar tal topologia uma rede em malha. A distância entre os nós foram aproximadas para representar múltiplos de 100 quilômetros. Será considerado que o alcance máximo de um caminho óptico é de 500 km sem necessitar regeneração caso não passe por nó intermediário e 400 km caso contrário.

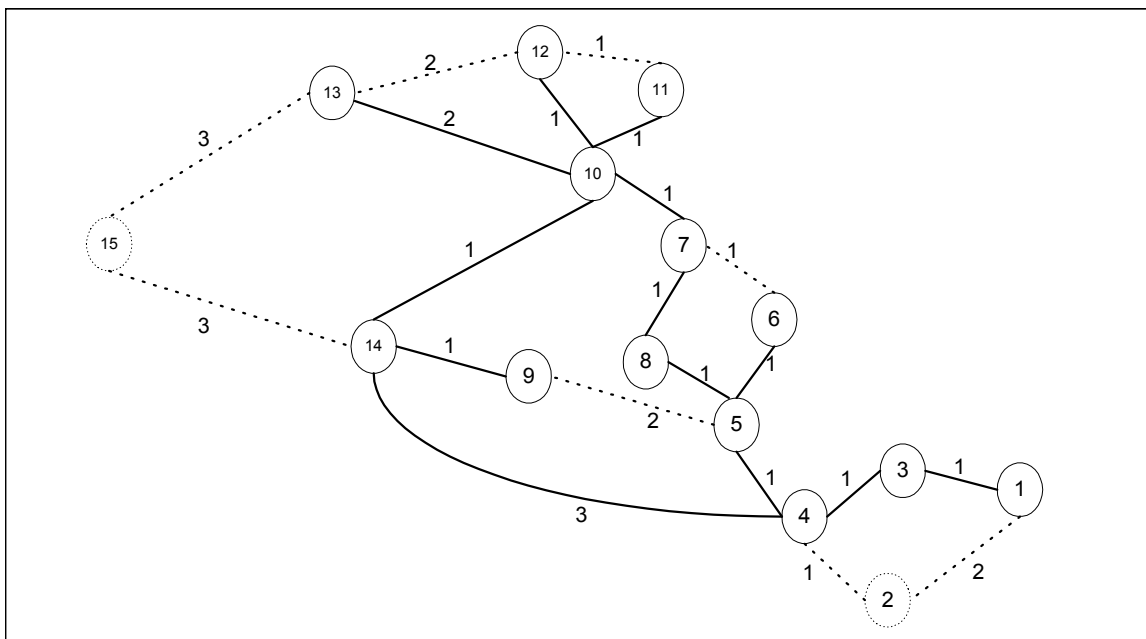


Fig. 4.8: Rede ANSP modificada com 15 nós. Os números nos enlaces representam a distância em múltiplos de 100 km entre os nós.

As cidades enumeradas na Fig. 4.8 são:

- 1 - Cachoeira Paulista
- 2 – Santos (adicionada a rede original)
- 3 - São José dos Campos
- 4 - São Paulo
- 5 - Campinas
- 6 - Rio Claro
- 7 - São Carlos
- 8 - Piracicaba

- 9 - Botucatu
- 10 - Araraquara
- 11 - Ribeirão Preto
- 12 - Jaboticabal
- 13 - São José do Rio Preto
- 14 - Bauru
- 15 - Presidente Prudente (adicionada a rede original)

Deseja-se estabelecer uma determinada matriz de tráfego, baseada em circuitos SDH, com taxas de STM-4 (622 Mbps), STM-16 (2,5 Gbps) e STM-64 (10 Gbps), conforme a Tab. 4.9.

| s,d | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|-----|---|---|----|-----|-----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | - | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | - | 16 | 128 | 64 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 4 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | - | 128 | 64 | 0 | 4 | 4 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 4 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | - | 256 | 64 | 256 | 64 | 64 | 64 | 64 | 4 | 64 | 64 | 4 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 16 | 64 | 64 | 16 | 64 | 64 | 0 | 16 | 16 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 4 | 4 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 16 | 0 | 16 | 4 | 0 | 0 | 4 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 4 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 4 | 0 | 4 | 4 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 4 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 4 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 4 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |

Tab. 4.9 - Matriz de tráfego da Fig. 4.8, onde cada unidade representa um múltiplo da taxa STM-1 (155 Mbps). A matriz de tráfego foi preenchida formando uma matriz triangular, pois o tráfego é bidirecional.

Serão estudadas duas alternativas para esta rede translúcida. A primeira alternativa considera que em qualquer nó é possível haver regeneração, e que os comprimentos de onda, podem transportar qualquer taxa de dados, STM-4, STM-16 ou STM-64, apesar das diferentes taxas, a granularidade deste problema é o comprimento de onda. A segunda alternativa será calcular quais nós da rede são os mais aptos a serem nós hubs (onde será possível fazer *grooming* e se comunicar com outros nós hubs), e quais nós pertencerão a cada ilha de transparência criada, nesta alternativa a granularidade são circuitos SDH que não necessariamente ocuparão um comprimento de onda inteiro.

1ª Alternativa: Em qualquer nó pode haver regeneração

A primeira alternativa se resolve, da mesma maneira que a rede do sudeste. Como mostram as Fig. 4.9 e 4.10, são necessários no mínimo 13 comprimentos de onda com 8 regeneradores para estabelecer todas as conexões necessárias. Com 14 comprimentos de onda, que é a melhor solução, são necessários somente 7 regeneradores, enquanto somente com 15 ou mais λ 's, se consegue estabelecer todos os caminhos ópticos utilizando o menor caminho em todas as conexões, porém ainda serão necessários 7 regeneradores. A Tab. 4.10 mostra uma possível resolução do RWA para 13 comprimentos de onda, mostrando os nós onde deverá haver regeneração.

| S | D | Wavelength | Caminho | Distância | Regeneração |
|----------|----------|-------------------|------------------|------------------|--------------------|
| 1 | 4 | 1 | 1,3,4 | 2 | |
| 2 | 3 | 1 | 2,4,3 | 2 | |
| 2 | 4 | 12 | 2,4 | 1 | |
| 2 | 4 | 7 | 2,4 | 1 | |
| 2 | 5 | 11 | 2,4,5 | 2 | |
| 2 | 11 | 6 | 2,4,14,10,11 | 6 | 14 |
| 2 | 14 | 4 | 2,4,14 | 4 | |
| 3 | 4 | 2 | 3,4 | 1 | |
| 3 | 4 | 9 | 3,4 | 1 | |
| 3 | 5 | 6 | 3,4,5 | 2 | |
| 3 | 7 | 8 | 3,4,5,6,7 | 4 | |
| 3 | 8 | 4 | 3,4,5,8 | 3 | |
| 3 | 11 | 5 | 3,4,14,10,11 | 6 | 14 |
| 3 | 14 | 3 | 3,4,14 | 4 | |
| 4 | 5 | 13 | 4,5 | 1 | |
| 4 | 5 | 2 | 4,5 | 1 | |
| 4 | 5 | 1 | 4,5 | 1 | |
| 4 | 5 | 12 | 4,5 | 1 | |
| 4 | 6 | 10 | 4,5,6 | 2 | |
| 4 | 7 | 9 | 4,5,6,7 | 3 | |
| 4 | 7 | 3 | 4,5,8,7 | 3 | |
| 4 | 7 | 2 | 4,14,10,7 | 5 | 10 ou 14 |
| 4 | 7 | 5 | 4,5,8,7 | 3 | |
| 4 | 8 | 7 | 4,5,8 | 2 | |
| 4 | 9 | 1 | 4,14,9 | 4 | |
| 4 | 10 | 13 | 4,14,10 | 4 | |
| 4 | 11 | 10 | 4,14,10,11 | 5 | 10 ou 14 |
| 4 | 12 | 7 | 4,14,10,12 | 5 | 10 ou 14 |

| | | | | | |
|----|----|----|-------------|-----|----------|
| 4 | 13 | 11 | 4,14,10,13 | 6 | 10 ou 14 |
| 4 | 14 | 8 | 4,14 | 3 | |
| 4 | 15 | 12 | 4,14,15 | 6 | 14 |
| 5 | 6 | 5 | 5,6 | 1 | |
| 5 | 7 | 6 | 5,6,7 | 2 | |
| 5 | 8 | 11 | 5,8 | 1 | |
| 5 | 9 | 10 | 5,9 | 2 | |
| 5 | 10 | 7 | 5,6,7,10 | 3 | |
| 5 | 11 | 11 | 5,6,7,10,11 | 4 | |
| 5 | 13 | 3 | 5,6,7,10,13 | 5 | 10 |
| 5 | 14 | 8 | 5,9,14 | 3 | |
| 6 | 7 | 10 | 6,7 | 1 | |
| 6 | 8 | 1 | 6,5,8 | 2 | |
| 6 | 11 | 4 | 6,7,10,11 | 3 | |
| 7 | 8 | 1 | 7,8 | 1 | |
| 7 | 10 | 8 | 7,10 | 1 | |
| 7 | 11 | 12 | 7,10,11 | 2 | |
| 7 | 14 | 9 | 7,10,14 | 2 | |
| 8 | 9 | 1 | 8,5,9 | 3 | |
| 8 | 13 | 2 | 8,7,10,13 | 4 | |
| 9 | 14 | 1 | 9,14 | 1 | |
| 10 | 11 | 1 | 10,11 | 1 | |
| 10 | 13 | 10 | 10,13 | 2 | |
| 10 | 14 | 2 | 10,14 | 1 | |
| 11 | 13 | 1 | 11,10,13 | 3 | |
| 13 | 14 | 1 | 13,10,14 | 3 | |
| 14 | 15 | 1 | 14,15 | 3 | |
| | | | | 148 | |

Tab. 4.10: Solução do RWA *offline* para 13 λ 's da rede ANSP.

Obs.: As linhas em **negrito** representam os caminhos ópticos que não utilizam o caminho mais curto, pois estariam violando as restrições da formulação matemática.

Diferente da rede do sudeste, a melhor opção de projeto não coincidiu com o menor conjunto de λ .

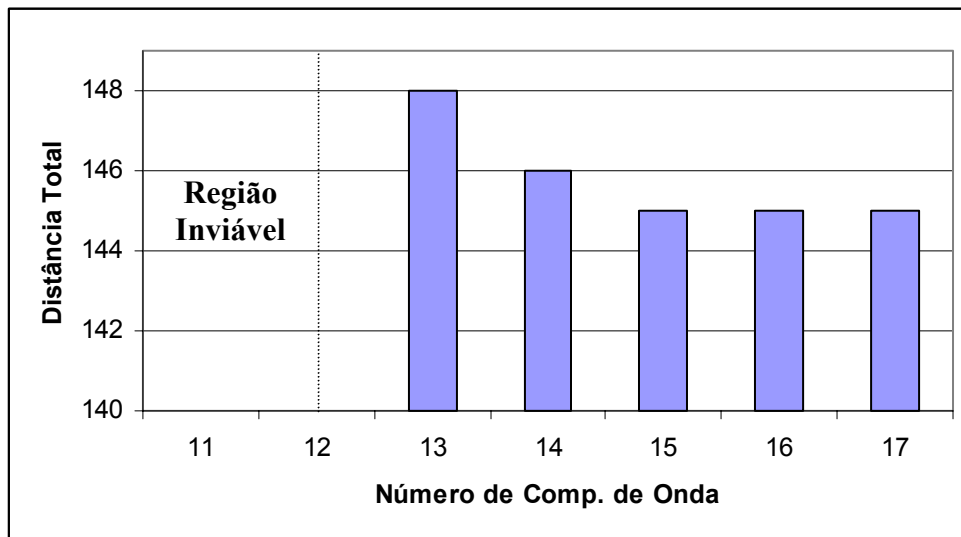


Fig. 4.9 – Somatória da distância de todos os caminhos ópticos (unidirecional) em função do número de λ 's.

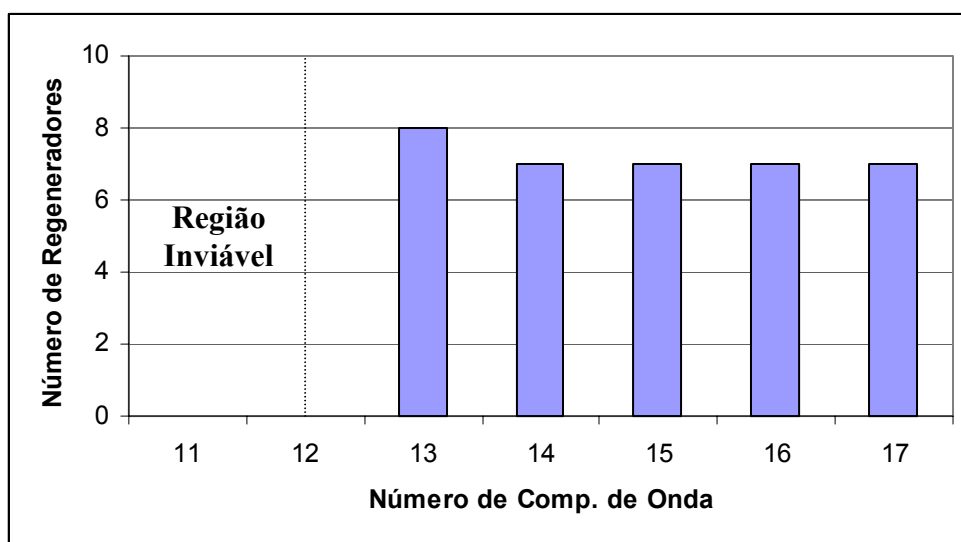


Fig. 4.10 – Número de regeneradores (apenas em uma direção) em função do número de λ 's.

2ª Alternativa: Ilhas de Transparência com Nós Hubs

Para a escolha dos nós hubs e ilhas de transparência, será usado a seguinte heurística de peso transicional [30]. A rede é modelada como um grafo não-direcionado $G = (V, L)$ onde V representa o conjunto de nós da rede e L representa o conjunto de enlaces bidirecionais da rede. Os nós da rede são numerados de 1, 2, ..., N e l_{ij} representa o enlace bidirecional entre os nós i e j . A rota mais curta entre s e d é representada por R_{sd} e B_{sd} é o tráfego entre s e d dado pela matriz de tráfego. Para a escolha dos nós hubs é calculado o

caminho óptico entre cada par de nós usando o algoritmo do caminho mais curto de Dijkstra. O parâmetro T_k^{sd} recebe o valor 1 se a rota entre s e d passa pelo nó k , podendo $k = s$ ou d , e recebe o valor 0 caso contrário. Fazendo isso obtém-se o peso transicional (PT) de cada nó k como

$$W_k = \sum_{\forall s,d,s \neq d,s < d} (T_k^{sd} B_{sd}), k \in \{1, 2, \dots, N\}$$

A idéia do PT é escolher os nós hubs, como sendo aqueles por onde passa o maior tráfego a partir das rotas mais curtas. A heurística proposta escolherá os nós hubs na ordem decrescente dos PT, obedecendo determinadas restrições relativas à camada física.

Em [30], caso o nó k seja a origem s ou o destino d , o valor T_k^{sd} será igual a 0, pois está-se interessado na alocação esparsa de nós com comutadores eletrônicos (desta forma, realizando regeneração e permitindo conversão de comprimento de onda também), logo não faz sentido “pontuar” os nós que sejam origem ou destino de seus próprios tráfegos pois não necessitarão de regeneração nem de conversão de comprimento de onda. No caso presente, faz-se sentido “pontuar” estes nós origem-destino, pois está-se interessado além de possível regeneração, realizar *grooming* de tráfegos de baixa taxa.

Na Fig. 4.11, vê-se que os principais nós candidatos a nós hubs são em ordem decrescente de PT: 4, 5, 6, 7 e 10. Houve um desbalanceamento de PT entre os nós 6 e 8 (eles são equidistantes dos nós 5 e 7), na aplicação do algoritmo de Dijkstra, corrigindo este desbalanceamento o nó 6 deixa de figurar entre os principais candidatos. Os nós hubs serão escolhidos de acordo com as seguintes regras.

- 1 – Os nós escolhidos como hubs serão aqueles que tiverem o maior PT respeitando as restrições da camada física dentro das ilhas de transparência e entre os nós hubs.
- 2 – Os nós não-hubs pertencerão a ilha de transparência do nó hub mais perto. Em caso de empate, pode-se arbitrar tal resultado.

Basicamente, a restrição da camada física utilizada é de que o comprimento máximo de um caminho óptico será de 500 km sem necessitar regeneração caso não passe por nó intermediário e 400 km caso passe. Como dentro de uma ilha de transparência não necessita-se regeneração, as conexões requeridas dentro de uma mesma ilha de transparência não podem distar mais de 400 km (ou 500 km caso seja uma conexão ponto-a-ponto) de distância, tal restrição é igual para nós hubs vizinhos

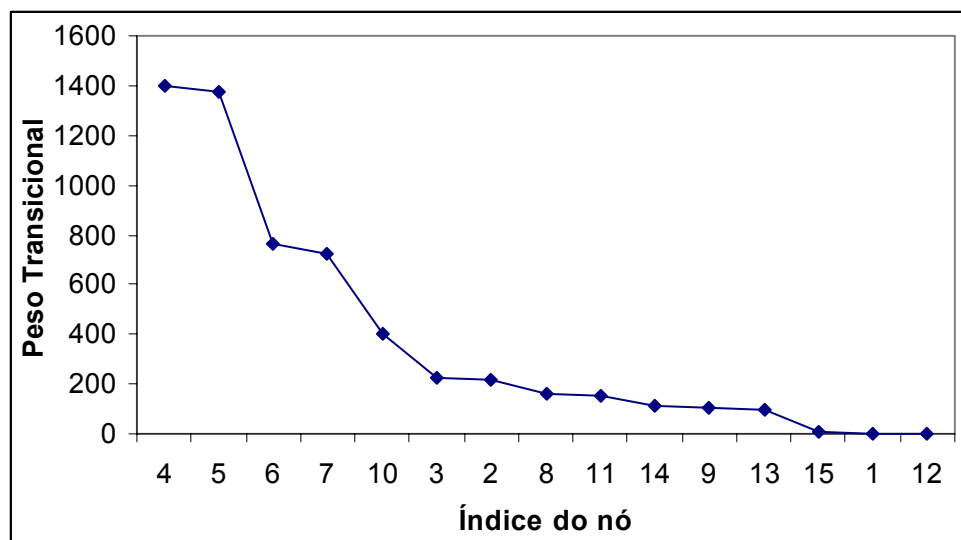


Fig. 4.11 – Distribuição de PT na ANSP.

Não faz sentido ter apenas um nó hub que faça *grooming* nesta rede, logo pode-se trabalhar a partir de 2 nós. Por isso serão estudados os casos com 2 e 3 nós hubs. Para 2 hubs, de acordo com os valores de PT, os escolhidos seriam os nós 4 e 5, mas seguindo as regras estabelecidas, os nós 4 e 10 serão os nós hubs. Para 3 hubs, os escolhidos serão os nós 4, 5 e 10.

ANSP Com 2 Nós Hubs:

A Fig. 4.12 mostra a ANSP com os 2 nós hubs e as respectivas ilhas de transparências. É interessante notar que caso houvesse uma requisição de conexão entre os nós 15 e 11 ou 15 e 12, seria necessária regeneração, logo não se teria mais uma ilha de transparência, pois está-se considerando que o limite de distância sem necessitar de regeneração é de 400 km, e para esses caminhos ópticos o caminho mais curto é de 500 km. Será considerado que dentro de uma ilha de transparência, pode-se estabelecer conexões na granularidade de um comprimento de onda com taxas desde STM-4 (622 Mbps) até STM-64 (10 Gbps), e entre os nós hubs, pode-se estabelecer conexões na granularidade de um comprimento de onda nas taxas de STM-16 (2,5 Gbps) ou STM-64. Os nós hubs farão a (de)multiplexação de determinadas requisições para se adequar as taxas padrões, logo será necessário a utilização de ADM's nestes nós (OXC poderão ou não fazer *grooming* também, porém está sendo considerado a necessidade de equipamentos SDH separados para realizar tal função).

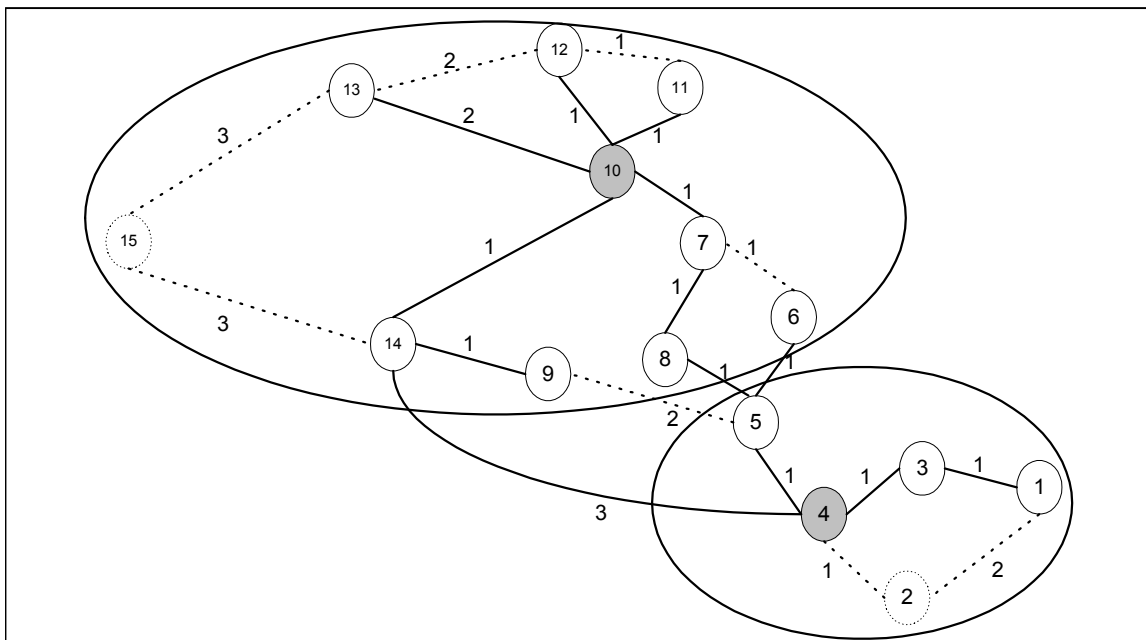


Fig.4.12 – ANSP com 2 nós hubs e respectivas ilhas de transparência

Entre os nós hubs, é preciso estabelecer os seguintes circuitos, de acordo com a Tab.

4.9:

- 8 STM-4
- 4 STM-16
- 15 STM-64

Os circuitos STM-64 já estão prontos para serem estabelecidos, cada um ocupando um comprimento de onda, as conexões STM-16 também, mas pode ser mais interessante multiplexá-las para transmitir em 10 Gbps, e economizar comprimentos de onda. Já os outros circuitos STM-4, necessariamente serão multiplexados em STM-16 ou STM-64, daí a importância de ser feita uma previsão de custos para avaliar qual a melhor solução levando em conta o compromisso entre número de λ 's (quanto menor o número de λ 's, menos transponders serão necessários) e número de ADM's que representam fatores importantes no custo total do sistema. Como regra geral, espera-se que um aumento de 4x na capacidade represente um acréscimo de 2 – 2,5 vezes o custo atual do equipamento [1]. Será estipulado para efeito de cálculo que o custo de um ADM STM-64 é 2,5 vezes maior que o custo de um ADM STM-16.

Para o caso de 2 nós hubs serão estudadas 3 possíveis configurações.

Configuração 1:

21 caminhos ópticos (15 STM-64 e 6 STM-16) entre os nós hubs.

Nó 4: 2 ADM's STM-16

Nó 10: 2 ADM's STM-16.

Configuração 2:

18 caminhos ópticos (16 STM-64 e 2 STM-16) entre os nós hubs.

Nó 4: 1 ADM STM-64 e 2 ADM STM-16

Nó 10: 1 ADM STM-64 e 2 ADM STM-16.

Configuração 3:

17 caminhos ópticos (17 STM-64) entre os nós hubs.

Nó 4: 2 ADM's STM-64

Nó 10: 2 ADM's STM-64.

Número de Comprimentos de Onda:

Para estabelecer todas as conexões dentro das ilhas de transparência, serão necessários 6 comprimentos de ondas em ambas as ilhas. Como é possível a reutilização de λ 's, e dividindo o tráfego entre hubs, utilizando as rotas 4-5-(6 ou 8)-7-10 e 4-14-10, serão necessários 16, 14 e 14 λ 's no total para as configurações 1, 2 e 3 respectivamente.

Custo dos ADM'sConfiguração 1:

4 ADM's STM-16 → 4 unidades monetárias

Configuração 2:

2 ADM's STM-64 e 4 ADM's STM-16 → 9 unidades monetárias

Configuração 3:

4 ADM's STM-64 → 10 unidades monetárias

Apesar de precisar de um conjunto de λ maior do que as outras opções, a configuração 1, é bem mais interessante economicamente e deve ser a escolhida. Entre as opções 2 e 3, seria necessário uma análise mais aprofundada para escolher qual a segunda melhor configuração, pois apesar de ter um custo inicial mais baixo, a configuração 2

precisará de um pouco mais de transponders (o custo dos transponders não foi analisado) e necessitará de uma atualização um pouco mais cedo do que a configuração 3 (pois esta última tem 5 Gbps livres em um λ , que poderia ser usado para outras finalidades), além que pode ser melhor do ponto de vista de gerenciamento manter o maior número possível de conexões com a mesma taxa de transmissão.

ANSP Com 3 Nós Hubs:

A Fig. 4.13 mostra a ANSP com 3 nós hubs, nós 4, 5 e 10.

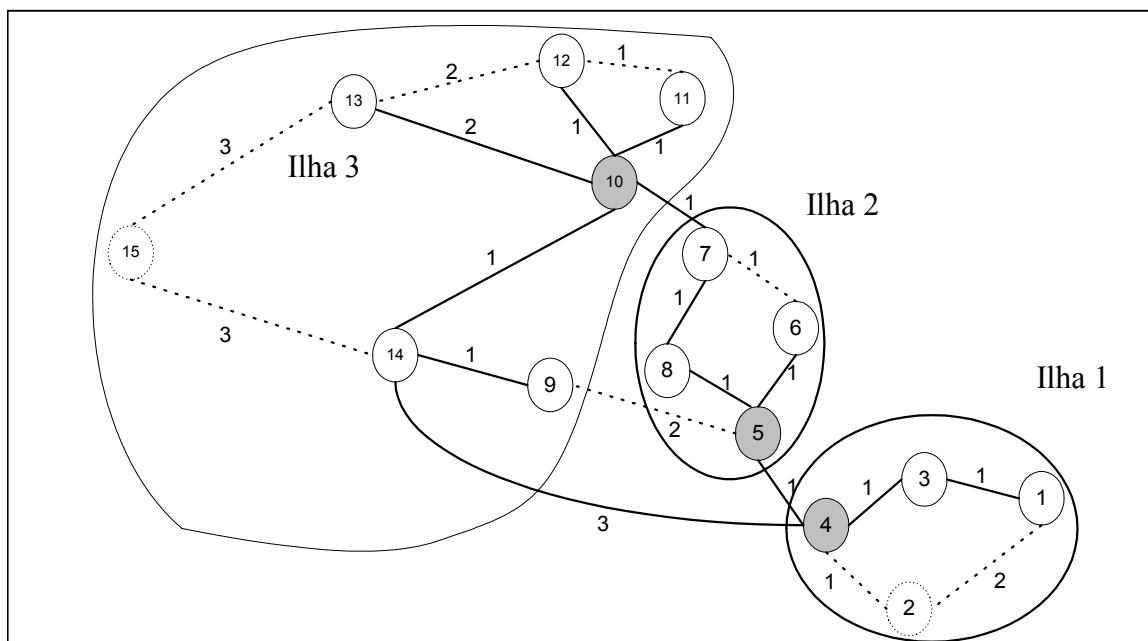


Fig. 4.13 – ANSP com 3 nós hubs e respectivas ilhas de transparência.

Entre os nós hubs, é preciso estabelecer os seguintes circuitos, de acordo com a Tab.

4.9:

Nó 4 e Nó 5:

- 2 STM-4
- 12 STM-64

Nó 4 e Nó 10:

- 6 STM-4
- 5 STM-64

Nó 5 e Nó 10:

- 5 STM-4

- 4 STM-16
- 2 STM-64

Para este caso serão estudadas 2 possíveis configurações.

Configuração 1:

12 caminhos ópticos (STM-64) entre os nós 4 e 5

1 caminho óptico (STM-16) entre os nós 4 e 10 onde foram multiplexados 4 STM-4.

1 caminho óptico (STM-16) entre os nós 4 e 5 onde foram multiplexados 2 STM-4 cujo nó origem é o 4, e o destino o 5 e 2 STM-4 cuja origem é o nó 4 e o destino o nó 10.

1 caminho óptico (STM-16) entre os nós 5 e 10 onde foram multiplexados 2 STM-4 cujo nó de origem é o 4, sendo demultiplexado no nó 5 e multiplexado novamente junto com outro STM-4 de origem nó 5 e destino nó 10.

1 caminho óptico (STM-16) entre os nós 5 e 10 onde foram multiplexados 4 STM-4.

5 caminhos ópticos (STM-64) entre os nós 4 e 10

3 caminhos ópticos (STM-64) entre os nós 5 e 10, sendo um proveniente da multiplexação de 4 STM-16.

Logo, serão necessários:

Nó 4: 2 ADM's STM-16

Nó 5: 2 ADM's STM-16 e 1 ADM STM-64

Nó 10: 3 ADM's STM-16 e 1 ADM STM-64.

Configuração 2:

13 caminhos ópticos (STM-64) entre os nós 4 e 5, sendo um STM-64 carregando 2 STM-4 de destino 5 e 6 STM-4 de destino 10 que terão que ser demultiplexados e multiplexados em 5.

5 caminhos ópticos (STM-64) entre os nós 4 e 10.

3 caminhos ópticos (STM-64) entre os nós 5 e 10, sendo um proveniente da multiplexação de 4 STM-16.

1 caminho óptico (STM-64) entre os nós 5 e 10, carregando 6 STM-4 de origem 4 e destino 10 e 5 STM-4 de origem 5 e destino 10.

Logo, serão necessários:

Nó 4: 1 ADM STM-64

Nó 5: 2 ADM STM-64

Nó 10: 1 ADM STM-64.

Número de Comprimentos de Onda:

Para estabelecer todas as conexões dentro das ilhas de transparência, serão necessários 3 λ 's nas ilhas 1 e 2, e 2 λ 's na ilha 3. Como é possível a reutilização de λ 's, e dividindo o tráfego entre hubs, será necessário um conjunto de 13 λ 's para ambas as configurações, porém só serão utilizados os 13 λ 's entre os nós 4 e 5. Na configuração 1, entre os nós 5 e 10 pelo caminho mais curto serão necessários 7 λ 's e entre os nós 4 e 10 utilizando o caminho 4-14-10 serão necessários 8 λ 's. Na configuração 2, utilizando os mesmos caminhos, serão necessários 6 λ 's entre os nós 5 e 10, e 7 λ 's entre os 4 e 10.

Custo dos ADM's

Configuração 1:

7 ADM's STM-16 e 2 ADM's STM-64 → 12 unidades monetárias

Configuração 2:

5 ADM's STM-64 → 12,5 unidades monetárias

Ambas as configurações têm um custo inicial muito próximo. Porém como a configuração 2 utiliza um número um pouco menor de λ 's entre os hubs (logo menos transponders), tendo uma banda sub-utilizada um pouco maior, deixando o período para uma nova atualização do sistema um pouco mais longe. A princípio, esta opção é mais atraente em relação a primeira, porém pior do que se utilizasse a ANSP com 2 nós hubs. Logo se faz necessário uma análise econômica mais aprofundada.

4.5 – Comentários dos Resultados

Este capítulo mostrou diferentes estratégias de projeto de redes translúcidas de longa distância, apresentando a formulação do LTD e RWA, além de uma estratégia envolvendo ilhas de transparências.

As soluções encontradas através do LTD foram soluções sub-ótimas devido o tempo proibitivo para alcançar a solução ótima. Já as soluções do RWA foram soluções ótimas pois o tempo para chegar a tal solução era da ordem de alguns minutos. Para definir os nós

hubs das ilhas de transparência foi considerado um algoritmo de peso transicional (PT), que considera o total de tráfego que passa por cada nó, utilizando sempre a rota mais curta, para definição destes nós foi considerando também um limite para o alcance máximo de cada caminho óptico.

Em relação a solução do LTD, considerando o caso de $\Delta = 8$, é interessante notar que nem todos os nós terão 8 caminhos ópticos entrando e/ou saindo, o que mostra que realmente os valores que foram encontrados não são ótimos, pois utilizando todos os caminhos ópticos possíveis permite distribuir melhor o tráfego, de tal forma a diminuir o congestionamento ainda mais. Sobre a factibilidade do problema para $\Delta = 4$, não é possível afirmar, porém considerando o valor do congestionamento para Δ igual a 5 e 6, que são 0,6725 e 0,5138 respectivamente, provavelmente existe uma solução, porém em 92 horas tal solução não foi encontrada.

Na solução do RWA, se obteve uma resposta ótima, porém outras soluções são possíveis e ótimas também, pois há vários caminhos ópticos que podem passar por diferentes rotas de mesma distância. Além do mais, se pode ter um combinação diferente para as alocações de comprimentos de onda de cada caminho óptico.

Sobre utilização de ilhas de transparência e nós hubs, é uma possibilidade totalmente viável de ser aplicada em redes translúcidas, e interessante em vários aspectos, pois divide toda a rede em domínios de tal forma que pode facilitar o controle e gerenciamento da rede como um todo, assim como facilitar o isolamento de falhas, melhorando a proteção e restauração das conexões.

Os resultados obtidos de cada abordagem sugerem que pode vir a ser mais apropriado a convergência destas abordagens, pois nós hubs podem ser nós com recursos eletrônicos que poderão servir qualquer caminho óptico da rede (o que pode ser mais eficiente do ponto de vista de custos), e para escolha destes nós se terá que resolver pelo menos o problema de roteamento dos caminhos ópticos, que por sua vez ou já estão definidos ou ainda precisam ser resolvidos com o auxílio do LTD.

CAPÍTULO 5 – Conclusões e Investigações Futuras

Esta dissertação tratou do problema de projeto de redes translúcidas de longa distância numa abordagem que deve ser apropriada para as primeiras redes ópticas de nova geração, onde equipamentos legados como caixas SDH/SONET terão que coexistir com novas tecnologias como *all-optical* OXC. Foram tratadas também opções de arquiteturas para estas redes ópticas de nova geração, porém a única certeza é que as futuras redes seguirão uma estrutura baseada em IP sobre WDM, onde o MPLS deverá se integrar ao IP, provendo novas funções e QoS, além da capacidade de engenharia de tráfego. Variações do MPLS estão sendo propostas como GMPLS e MPλS, porém estas variações não foram apresentadas no presente trabalho.

Foram consideradas três diferentes estratégias para projetar uma rede de longa distância. A primeira utilizou o modelo mais clássico de projeto de redes de roteamento de comprimentos de onda, onde primeiramente resolve-se o problema de LTD para depois solucionar o RWA. Neste caso utilizou-se uma rede hipotética brasileira de 12 nós, onde os comprimentos dos caminhos ópticos mais longos são da ordem dos enlaces mais modernos utilizando tecnologia solitônica, por isso não se esteve preocupado na alocação de regeneradores. A principal diferença desta primeira abordagem em relação à maioria dos outros trabalhos, é a possibilidade no estabelecimento de múltiplos caminhos ópticos entre um par origem-destino, e a inserção da restrição que limita o tráfego do caminho óptico à taxa de bits da linha óptica.

A segunda estratégia apresentou um método para minimizar o número de regeneradores utilizados numa rede translúcida. Esta abordagem foi aplicada a uma rede hipotética da região sudeste do Brasil com 8 nós e a ANSP (na realidade uma variação da ANSP com 15 nós), e sugere que a alocação esparsa de nós com capacidades eletrônicas pode vir a ser mais interessante do que prover esta capacidade a qualquer nó. Nos exemplos realistas levados à discussão, alguns nós centrais tendem a regenerar ou fazer um *bypass* na maioria dos sinais comparados aos nós periféricos, além de serem locais onde a maioria dos caminhos ópticos já têm uma grande quantidade de degradações acumuladas, sendo melhor concentrar a capacidade eletrônica em alguns desses nós centrais.

A última estratégia, que considera ilhas de transparência, sugere que deve ser escolhido o menor número possível de nós equipados com regeneradores e ADM para manter o custo do investimento inicial o menor possível, já que, dependendo do projeto, grande variações nestes custos podem ocorrer.

Apesar de que a estratégia de ilhas de transparência seja muito interessante, talvez a alocação esparsa de nós equipados com capacidades eletrônicas seja mais econômica, pois os recursos eletrônicos destes nós podem ser compartilhados por todos os caminhos ópticos da rede, ao invés da possibilidade de que somente as conexões das respectivas ilhas de transparência utilizarem estes recursos.

Na realidade, a alocação esparsa de nós com capacidade eletrônica pode ser uma evolução das ilhas de transparência com os respectivos nós hubs, pois muitas redes apresentam uma não-uniformidade espacial do tráfego em redes de longa distância, já que o tráfego entre nós é diretamente proporcional ao número de clientes de cada nó, e inversamente proporcional a distância entre estes nós. Então em redes com um número reduzido de grandes centros (como a ANSP), e que sejam relativamente afastados entre si, talvez possa vir a ser mais interessante aplicar ilhas de transparência, enquanto para redes com tráfego mais uniforme, onde existam vários grandes centros relativamente não tão afastados entre si (como por exemplo uma rede européia), talvez seja mais interessante utilizar a alocação esparsa de nós com capacidades eletrônicas.

5.1 – Investigações Futuras

Sendo um assunto novo, e despontando como a futura rede de transporte, as redes ópticas tem uma enorme gama de assuntos a serem abordados. Como avanço da presente dissertação, os seguintes assuntos podem e devem ser investigados.

a) Restrições da camada física, considerando os fenômenos lineares e não-lineares individualmente e como fatores limitantes dos caminhos ópticos, não apenas como penalidades. Compensação de dispersão cromática e de modos de polarização.

b) Vantagens e desvantagens de novos dispositivos como conversores de λ completamente ópticos, amplificadores ópticos na banda S e L, arquiteturas de OXC.

c) Realizar simulações com topologias multi-fibras, considerando fibras heterogêneas.

d) Aprofundamento nos estudos das arquiteturas de redes ópticas. Mostrando a convergência das diversas redes em uma rede multi-serviço.

e) Desenvolvimento de métodos heurísticos para resolução do LTD e do RWA, considerando alocação dinâmica de caminhos ópticos ou banda, em diversos modelos de tráfego.

f) Proteção e restauração em redes ópticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – R. Ramaswami e K.N. Sivaraja, “Optical Networks: A Practical Perspective”, 2nd ed. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- [2] – R. Ramaswami e K.N. Sivaraja, “Optical Networks: A Practical Perspective”. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers, 1998.
- [3] – Govind P. Agrawal, “Fiber-Optic Communication Systems”, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [4] – T.E. Stern and K. Bala, “Multiwavelength Optical Networks: a Layered Approach”, Addison Wesley Longman, Inc, 1999.
- [5] – Gerd Keiser, “Optical Fiber Communications”, 3rd ed. McGraw Hill, 2000.
- [6] – B. G. Lee e W. Kim, “Integrated Broadband Networks: TCP/IP, ATM, SDH/SONET, and WDM/Optics”, Artech House, INC, 2002.
- [7] – Tutorial da ALCATEL, “Optical Networks”, disponível em www.webproforum.com [capturado em outubro de 2001].
- [8] – Walter Goralski, “Optical Networking & WDM”. McGraw-Hill, 2001.
- [9] – Byrav Ramamurthy, “Design of Optical WDM Networks: Lan, Man and WAN Architectures”, Kluwer Academic Publishers.
- [10] – Peng-Jun Wan, “Multichannel Optical Networks”. Kluwer Academic Publishers 2000.
- [11] – William Stallings, “High-Speed Networks: TCP/IP and ATM Design Principles”. Prentice Hall, 1998.
- [12] – J. Walrand e P. Varaiya, “High-Performance Communication Networks”, 2nd ed. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, California, 2000.
- [13] – L.B. de Sousa, “Redes de Computadores: Dados, Voz e Imagem”, 3^a ed. Érica, 2000.
- [14] - Andrew Tanenbaum, “Redes de Computadores”, 3a Edição, Editora Campus, 1997.
- [15] – David C. Blight e Peter J. Czezowski, “Management issues for IP over DWDM networks”. Optical Networks Magazine, Janeiro/Fevereiro 2001.
- [16] – B. Davie e Y. Rekhter, “MPLS: Technology and Applications”. Morgan Kaufmann Publishers, 2000.
- [17] – Uyles Black, “MPLS and Label Switching Networks”. Prentice Hall, 2001.

- [18] – M. F. Magalhães e E. Cardozo, “Introdução à Comutação IP por Rótulos Através de MPLS”. Apostila do Curso IA-003, Interconexão de Redes de Computadores. Maio 2001.
- [19] – Maher Ali, “Transmission-Efficient Design and Management of Wavelength-Routed Optical Networks”. Kluwer Academic Publishers 2001.
- [20] – Keyao Zhu e Biswanath Mukherjee, “ Traffic Grooming in a Optical WDM Mesh Network”. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Special Issue on "WDM-Based Network Architectures", vol. 20, no. 1, pp. 122-133, Jan. 2002.
- [21] – Howard Kidorf, et al, “Performance improvement in high capacity, ultra-long distance, WDM systems using forward error correction codes”. OFC 2000.
- [22] – Ait Sab e V. Lemaire, “Block Turbo Code Performances for long-haul DWDM optical-transmission systems”. OFC 2000.
- [23] – Howard Kidorf, et al, “Forward Error Correction Techniques in Long-Haul Optical Transmission Systems”. LEOS 2000.
- [24] – Philip F. Walch, “Contribution to Q 18/15 Meeting on Revision ITU-T G.975, Forward Error Correction for Submarine Systems”. Disponível em <ftp://ftp.tiaonline.org/fo-2/Fo211/Public/Savannah-January%202000/FO211-00-01-TD11.doc> [capturado em 27/09/02].
- [25] – J. Strand, A. L. Chiu e R. Tkach, “Issues For Routing in The Optical Layer”, IEEE Communications Magazine, Fev. 2001.
- [26] – K. Bala,, “Transparent, opaque and hybrid optical networking”, Optical Networks, vol. 1, p. 10, July 2000.
- [27] – Maher Ali, “Transmission-Efficient Design and Management of Wavelength-Routed Optical Networks”. Kluwer Academic Publishers 2001.
- [28] – B. Ramamurthy, H. Feng, D. Datta, J.P. Heritage, and B. Mukerjee, “Transparent vs. opaque vs. translucent wavelenth-routed optical networks”, Optical Fiber Communication (OFC '99) Technical Digest, San Diego, CA, Feb. 1999.
- [29] – Byrav Ramamurthy, Srinath Yaragorla, Xi Yang, “Translucent Optical WDM Networks for the Next-Generation Backbone Networks”, in Proceedings, IEEE Globecom 2001, San Antonio, TX, Nov. 2001.

- [30] – G. Shen, W. D. Grover, T. H. Cheng, S. K. Bose. “Sparse placement of electronic switching nodes for low blocking in translucent optical networks”, *Journal of Optical Networking*, Vol. 1, No. 12, Dec. 2002.
- [31] – C.S.R. Murthy and M. Gurusamy, “WDM Optical Networks: Concepts, Design, and Algorithms” , Prentice Hall, 2002.
- [32] – R. M. Krishnaswamy and K. N. Sivarajan, “Design of Logical Topologies: A Linear Formulation for Wavelength-Routed Optical Networks with No Wavelength Changers”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 9, No. 2, April 2001.
- [33] – R. Ramaswami a K. N. Sivarajan, “Design of Logical Topologies for Wavelength-Routed Optical Networks”, *IEEE/JSAC*, vol.14, pp. 840-851, junho 1996.
- [34] – K. D. R. Assis, “Projeto de Topologia Virtual em Redes Ópticas”, *Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. UFES*, abril de 2000.
- [35] – H. Waldman and K.D.R Assis, “An Integrated Design for Virtual and Physical Topologies with Wavelength Conversion Resources”, a ser publicado.

Artigos Publicados em Anais de Congressos

- [1] – A. L. Souza Filho and H. Waldman, “Strategies For Designing Translucent Wide-Area Networks”, *IMOC 03, Foz do Iguaçu (PR)*, setembro 2003.
- [2] – A. L. Souza Filho and H. Waldman, “Fair Power Distribution Among WDM Channels in a Transparent Linear Network”, *SBT 03, Rio de Janeiro (RJ)*, outubro 2003.