

Dissertação de Mestrado

Helder Alves Pereira

Otimização de Tráfego: Roteamento e Critérios de Proteção em Redes Ópticas

2002

Inatel
Instituto Nacional de Telecomunicações

**OTIMIZAÇÃO DE TRÁFEGO:
ROTEAMENTO E CRITÉRIOS DE
PROTEÇÃO EM REDES ÓPTICAS**

HELDER ALVES PEREIRA

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Telecomunicações, como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Maurício Silveira

Santa Rita do Sapucaí
2002

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 26 de Julho de 2002,
pela banca examinadora constituída pelos professores:

Maurício Silveira – Instituto Nacional de Telecomunicações

José Antônio Justino Ribeiro – Instituto Nacional de Telecomunicações

José Edimar Barbosa Oliveira – Instituto Tecnológico da Aeronáutica

Coordenador do Curso de Mestrado

"A esperança não é a última que morre, mas é a primeira que nasce quando achamos que tudo está perdido." – Anônimo

*Aos meus pais, pelo eterno apoio e incentivo,
e à Dinalva, o grande amor da minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação é dedicada primeiramente aos meus pais, que contribuíram em todos aspectos à minha formação escolar e forneceram todo o apoio para concretizar mais esse passo em minha vida.

Também dedico este trabalho aos amigos que fiz em Santa Rita do Sapucaí, no Inatel, meus colegas de mestrado e de república, e aos professores que me forneceram todo o aprendizado necessário à implementação desta dissertação de mestrado.

Agradeço a Deus por toda a paciência e garra que pedi a Ele em minhas orações, aos meus pais, pelo amor incondicional e apoio fornecido mesmo com toda essa distância entre nós, ao grande amor da minha vida, Dinalva, pela paciência, atenção nos momentos mais difíceis e toda a compreensão que precisei para encontrar forças para continuar a caminhada.

Agradeço ao meu orientador, Maurício Silveira, pelo apoio e votos de confiança à minha pessoa, à professora Maria Regina pelos conselhos e conhecimento fornecidos nas aulas de fibras. Ao professor Justino pela disciplina, critérios exigidos em seus trabalhos e pela grande lição e honra que foi ser seu aluno.

Finalmente, ao DA do Inatel que foi um ótimo local para encontrar os amigos e espairecer um pouco. Ao meu grande amigo Ariosto, aos amigos que fiz no Inatel, ao Baiano pelos favores atendidos sempre em cima da hora. Ao César, que foi essencial à minha estadia na cidade, durante todo o tempo do mestrado. Aos Bês, Ablu, Piuí, Juninho, Maiko, Henrique, Fajardo, Wheberth, Tchinga (José Roberto), Raul, Vagner Vilela, Carlos Paula, Laert, Amarildo, Daniel, Rodrigo Bahia (o conterrâneo), Iwanir (o mano), André (grossinho), André (japa), Mílson, que contribuíram muito nos momentos de alegria, divertimento e descontração.

ÍNDICE

<u>LISTA DE FIGURAS</u>	<u>I</u>
<u>LISTA DE TABELAS.....</u>	<u>IV</u>
<u>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</u>	<u>V</u>
<u>LISTA DE SÍMBOLOS</u>	<u>VII</u>
RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
CAPÍTULO I.....	1
1. Introdução	1
1.1. Aplicações	2
1.2. Objetivos e Contribuições do Trabalho.....	3
1.3. Conteúdo da Dissertação	3
CAPÍTULO II	4
2. Redes Ópticas - Introdução, Variações e Topologias.....	4
2.1. As Redes nas Telecomunicações.....	4
2.2. A Primeira Geração das Redes Ópticas.....	5
2.3. A Segunda Geração das Redes Ópticas.....	5
2.3.1. Arquitetura de uma Rede WDM	7
2.3.1.1. Arquitetura de Transmissão e Seleção.....	7
2.3.1.2. Arquitetura de Roteamento de Comprimento de Onda	8
2.3.2. Protocolos de Controle de Acesso ao Meio	9
2.3.2.1. Protocolo Slotted Aloha / Slotted Aloha (SA/SA)	10
2.3.2.2. Protocolo DT–WDMA	13
2.3.2.3. Protocolos de Organização	15
2.3.3. Classes de Tráfego e Escalabilidade	15
CAPÍTULO III.....	17
3. Roteamento de Comprimento de Onda - Tipos de Redes e Algoritmos Utilizados	17
3.1. Redes de Roteamento de Comprimento de Onda.....	17
3.1.1. Grau de Transparência	18
3.1.2. Grau de Conversão de Comprimento de Onda	19
3.1.3. Projeto dos Nós	21
3.2. Modelos de Tráfego e Critérios de Desempenho	24
3.3. Tipos de Redes de Roteamento de Comprimento de Onda.....	27
3.3.1. Estática	27
3.3.2. Dinâmica	28

3.4. Compromissos de Custo da Camada Óptica	29
3.5. Roteamento e Atribuição de Comprimento de Onda	30
3.5.1. Relação de Coloração do Gráfico	31
3.5.2. RACO <i>Offline</i> - Modelo de Carga Máxima	32
3.5.3. RACO <i>Online</i> em Anéis - Modelo de Carga Máxima	36
3.5.4. RACO <i>Online</i> - Modelo Estatístico	41
3.5.5. Rotas Alternativas e Atribuição de Comprimento de Onda	42
3.6. Variações de Arquitetura	44
CAPÍTULO IV	47
4. Conceitos de Proteção e de Redes em Anel e em Malha	47
4.1. Funções do Gerenciamento de Redes	47
4.2. Conceitos de Proteção	50
4.3. Redes em Anel	53
4.3.1. UPSR	54
4.3.2. BLSR	55
4.3.3. Configuração Redundante	58
4.4. Redes em Malha	58
4.5. Interação entre Camadas	60
CAPÍTULO V	62
5. Análise do Roteamento nas Redes Ópticas	62
5.1. Simulação de Roteamento em uma Rede Óptica, com Nós apresentando, ou não, Conversão de Comprimento de Onda	62
5.2. Simulação de Redes Ópticas Estáticas e Dinâmicas	68
5.3. Simulação de Diferentes Tipos de Roteamento em uma Rede Óptica	71
CAPÍTULO VI	76
6. Critérios de Proteção e Topologias de Rede	76
6.1. Análise dos Diferentes Critérios de Proteção Utilizados em uma Rede Óptica em malha	76
6.2. Implementação das Arquiteturas em Anel BLSR/4 e UPSR	81
6.3. Comparação entre as Arquiteturas em Anel BLSR/4 e BLSR/2	90
CAPÍTULO VII	93
7. Tendências nas Redes Ópticas	93
7.1. Introdução	93
7.2. Redes Ópticas Passivas	96
7.3. Multiprotocolo de Comutação de Rótulo	97
7.3.1. Classe de Equivalência de Transmissão	98
7.3.2. Tipos de nós MPLS	99
7.4. Multiprotocolo de Comutação Lâmbda	99
7.5. MPLS Generalizado	100
7.6. WDM em Redes LAN e de Acesso	100
7.7. Comutação de Pacotes Ópticos	101
CONCLUSÃO	103
BIBLIOGRAFIA	105

APÊNDICE I: Programa em MatLab que gera um gráfico do número de acopladores em função dos usuários da rede - Figura 2.3	107
APÊNDICE II: Programa em MatLab que gera um gráfico de comparação entre os valores de throughput dos protocolos SA/SA básico e modificado - Figura 2.5	108
APÊNDICE III: Programa em MatLab que gera um gráfico dos valores de throughput do protocolo DT-WDMA - Figura 2.8	110
APÊNDICE IV: Programa em MatLab que realiza uma comparação entre redes estáticas para o caso ideal, Offline e Online - Figura 3.6.....	111
APÊNDICE V: Programa em MatLab que gera um gráfico do número de comprimentos de onda necessários em um roteamento RACO Offline adotando modelo de carga máxima - Figura 3.11	113
APÊNDICE VI: Programa em MatLab que gera um gráfico do número de comprimentos de onda necessários em uma rede em anel adotando o RACO Offline com modelo de carga máxima - Figura 3.13	115
APÊNDICE VII: Programa em MatLab que gera um gráfico do número de comprimentos de onda necessários para uma rede em linha adotando RACO Online com modelo de carga máxima – Figura 3.15	116
APÊNDICE VIII: Programa em MatLab que gera um gráfico do número de comprimentos de onda necessários para uma rede em anel adotando RACO Online com modelo de carga máxima - Figura 3.16	117
APÊNDICE IX: Programa em MatLab que gera dois gráficos referentes ao número de comprimentos de onda, adotando um RACO Online e modelo de carga máxima, considerando a ausência e a presença de conversão na rede - Figura 3.17 e Figura 3.18	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tipos de redes nas telecomunicações	4
Figura 2.2 – Configuração da rede de transmissão e seleção em (a) estrela e (b) barramento	8
Figura 2.3 – Comparação entre as redes estrela e barramento quanto ao número de acopladores utilizados	8
Figura 2.4 – Rede de roteamento de comprimento de onda.....	9
Figura 2.5 – Comparação dos valores de throughput dos protocolos SA/SA básico e modificado.....	12
Figura 2.6 – Gráfico semilog dos valores de throughput dos protocolos SA/SA básico e modificado	12
Figura 2.7 – Estrutura do intervalo de dados e de controle do protocolo DT-WDMA	13
Figura 2.8 – Valores de throughput do protocolo DT-WDMA	14
Figura 2.9 – Gráfico semilog dos valores de throughput do protocolo DT-WDMA ..	14
Figura 3.1 – Tipos de conversão de comprimento de onda	21
Figura 3.2 – Diagrama em blocos de um WXC.....	21
Figura 3.3 – WXC óptico sem conversão	22
Figura 3.4 – WXC óptico com conversão completa	23
Figura 3.5 – WXC com comutação eletrônica	23
Figura 3.6 – Comparação entre o roteamento para o caso ideal, Offline e Online ..	27
Figura 3.7 – Exemplo de um nó em uma rede estática	28
Figura 3.8 – Ilustração do problema de roteamento em uma rede	30
Figura 3.9 – Representação da rede G	31
Figura 3.10 – Representação de $P(G)$	32
Figura 3.11 – Gráfico do número de comprimentos de onda, relativo ao RACO Offline, adotando o modelo de carga máxima	33
Figura 3.12 – Representação gráfica do algoritmo de atribuição de comprimento de onda para uma rede em linha	34
Figura 3.13 – Gráfico do número de comprimentos de onda, relativo ao RACO Offline, para uma rede em anel	35
Figura 3.14 – Rede em anel com um nó apresentando conversão fixa	36
Figura 3.15 – Gráfico do número de comprimentos de onda, relativo ao RACO Online, para uma rede em linha	38
Figura 3.16 – Gráfico do número de comprimentos de onda, relativo ao RACO Online, para uma rede em anel.....	39
Figura 3.17 – (a) Gráfico do número de comprimentos de onda, relativo ao RACO Online, para uma rede em anel sem conversão	40
Figura 3.18 – (b) Gráfico do número de comprimentos de onda, relativo ao RACO Online, para uma rede em anel com conversão limitada	40
Figura 3.19 – Exemplo de uma rede LLN	44
Figura 3.20 – Representação de um LSC	45
Figura 4.1 – Diagrama em blocos do gerenciamento de uma rede	49

Figura 4.2 – Tipos de proteção em enlaces ponto a ponto	51
Figura 4.3 – Proteção [1:N]	52
Figura 4.4 – Proteção do caminho	53
Figura 4.5 – Proteção de duração	53
Figura 4.6 – Proteção de linha	53
Figura 4.7 – Rede em anel configurada na forma UPSR	54
Figura 4.8 – Rede em anel configurada na forma BLSR/4	55
Figura 4.9 – Proteção de duração no BLSR/4	56
Figura 4.10 – Proteção de linha no BLSR/4	56
Figura 4.11 – Rede em anel configurada na forma BLSR/2	57
Figura 4.12 – Configuração Dual Homing	58
Figura 4.13 – Possibilidade de falha em um nó	60
Figura 5.1 – Camada da fibra e do cliente	63
Figura 5.2 – Opções de roteamento	64
Figura 5.3 – Topologia na camada OMS	64
Figura 5.4 – Configuração do roteamento sem conversão	65
Figura 5.5 – Configuração do roteamento com conversão	67
Figura 5.6 – Configuração do roteamento dos comprimentos de onda utilizando algoritmo centralizado	69
Figura 5.7 – Configuração do roteamento dos comprimentos de onda utilizando algoritmo distribuído	70
Figura 5.8 – Configuração do roteamento considerando o método de mínimo salto	72
Figura 5.9 – Configuração do roteamento considerando o método de menor percurso	73
Figura 5.10 – Configuração do roteamento considerando o método de máxima confiabilidade	73
Figura 5.11 – Análise de duas demandas do cliente: (a) N2-N4 e (b) N1-N4	74
Figura 5.12 – Roteamento na camada do servidor das demandas: (a) N2-N4 e (b) N1-N4, utilizando o critério de mínimo salto	74
Figura 5.13 – Roteamento na camada do servidor das demandas: (a) N2-N4 e (b) N1-N4, utilizando o critério de menor percurso	75
Figura 5.14 – Roteamento na camada do servidor das demandas: (a) N2-N4 e (b) N1-N4, utilizando o critério de máxima confiabilidade	75
Figura 6.1 – Configuração do roteamento com critério de mínimo salto e sem proteção em uma rede óptica em malha	77
Figura 6.2 – Configuração do roteamento com critério de mínimo salto e com proteção do caminho com opção de enlace diferente em uma rede óptica em malha	78
Figura 6.3 – Configuração do critério da SCMR com método de recuperação do enlace	79
Figura 6.4 – Configuração do critério da SCMR com método de recuperação do caminho	81
Figura 6.5 – Camadas (a) do servidor e (b) do cliente	82
Figura 6.6 – Definição da topologia em anel BLSR/4	83
Figura 6.7 – Opções do projeto de uma rede BLSR/4	84
Figura 6.8 – Critérios de custo do equipamento WDM	85
Figura 6.9 – Critérios de custo do equipamento roteador	85
Figura 6.10 – Anéis topológicos	86

Figura 6.11 – <i>Anéis modulares</i>	87
Figura 6.12 – <i>Definição da topologia em anel UPSR</i>	87
Figura 6.13 – <i>Configuração de custo da rede UPSR considerando duas fibras</i>	88
Figura 6.14 – <i>Anéis topológicos</i>	89
Figura 6.15 – <i>Anéis modulares</i>	89
Figura 6.16 – <i>Definição da topologia em anel BLSR/2</i>	90
Figura 6.17 – <i>Configuração de custo do equipamento WDM</i>	91
Figura 6.18 – <i>Anéis topológicos</i>	92
Figura 6.19 – <i>Anéis modulares</i>	92
Figura 7.1 – <i>Topologia de uma rede óptica passiva</i>	96
Figura 7.2 – <i>Estrutura de uma rede MPLS</i>	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – <i>Comparação entre a aproximação óptica e a híbrida (optoeletrônica)</i>	24
Tabela 3.2 – <i>Resultados referentes a diferentes tipos de conversão</i>	36
Tabela 3.3 – <i>Resultado da simulação dos algoritmos para o cálculo do WRF</i>	43
Tabela 5.1 – <i>Matriz de tráfego da rede</i>	62
Tabela 5.2 – <i>Resultado do roteamento sem conversão</i>	66
Tabela 5.3 – <i>Resultado do roteamento com conversão</i>	67
Tabela 5.4 – <i>Resultado do roteamento de comprimento de onda</i>	69
Tabela 5.5 – <i>Resultado do roteamento de comprimento de onda</i>	70
Tabela 5.6 – <i>Configuração das distâncias e confiabilidades dos enlaces da rede</i>	71
Tabela 6.1 – <i>Resultado do roteamento em uma rede óptica em malha sem proteção</i>	77
Tabela 6.2 – <i>Resultado do roteamento em uma rede óptica em malha com Proteção [1+1]</i>	78
Tabela 6.3 – <i>Resultado do roteamento em uma rede óptica em malha com Proteção [1+1] empregando o método da SCMR com recuperação do enlace</i>	80
Tabela 6.4 – <i>Resultado do roteamento em uma rede óptica em malha com Proteção [1+1] empregando o método da SCMR com recuperação do caminho</i>	81
Tabela 6.5 – <i>Matriz de tráfego da rede em anel</i>	82
Tabela 6.6 – <i>Resultado da simulação de uma rede em anel BLSR/4</i>	86
Tabela 6.7 – <i>Resultado da simulação de uma rede em anel UPSR</i>	88
Tabela 6.8 – <i>Resultado da simulação de uma rede em anel BLSR/2</i>	91

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACO	ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA
ADM	ADD/DROP MULTIPLEXER
APS	AUTOMATIC PROTECTION SWITCHING
ATM	ASYNCHRONOUS TRANSFER MODE
BLSR	BIDIRECTIONAL LINE SWITCHING RING
CO	COMPRIMENTO DE ONDA
DWDM	DENSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING
FDDI	FIBER DISTRIBUTED DIGITAL INTERFACE
FEC	FORWARD EQUIVALENCE CLASS
FTTH	FIBER TO THE HOME
GMPLS	GENERALIZED MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING
IP	INTERNET PROTOCOL
LAN	LOCAL AREA NETWORK
LLN	LINEAR LIGHTWAVE NETWORK
LS	LABEL SWITCHING
LSC	LINEAR SPLITTER AND COMBINER
LSP	LABEL SWITCHING PATH
LSR	LABEL SWITCHING ROUTER
MAC	MEDIA ACCESS CONTROL
MAN	METROPOLITAN AREA NETWORK
MIB	MANAGEMENT INFORMATION BASE
MPLS	MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING
MP λ S	MULTIPROTOCOL LAMBDA SWITCHING
NGG	NÚMERO CROMÁTICO DO GRÁFICO
NEM	NETWORK ELEMENT MANAGER
NMC	NETWORK MANAGEMENT CENTER
OA	OPTICAL AMPLIFIER
OMS	OPTICAL MULTIPLEX SECTION
OTDM	OPTICAL TIME DIVISION MULTIPLEXING
PON	PASSIVE OPTICAL NETWORK
PXC	PHOTONIC CROSSCONNECT
QoS	QUALITY OF SERVICE
RAM	RANDOM ACCESS MEMORY
RACO	ROTEAMENTO E ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA
RCO	ROTEAMENTO DE COMPRIMENTO DE ONDA
SA/SA	SLOTTED ALOHA / SLOTTED ALOHA
SCMR	SHARED CAPACITY MESH RESTORATION
SDH	SYNCHRONOUS DIGITAL HIERARCHY
Sonet	SYNCHRONOUS OPTICAL NETWORK
TDM	TIME DIVISION MULTIPLEXING
UPSR	UNIDIRECTIONAL PATH SWITCHING RING
WAN	WIDE AREA NETWORK

WDM	WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING
WRF	WAVELENGTH REUSE FACTOR
WXC	WAVELENGTH CROSSCONNECT

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	COMPRIMENTO DE ONDA
d	GRAU DE CONVERSÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA EM UM NÓ
g	PROBABILIDADE DE ENVIO DE PACOTES MULTIPLICADA PELO NÚMERO DE NÓS PRESENTES NA REDE
G	REDE ALEATÓRIA
L	CARGA MÁXIMA EM UM ENLACE DA REDE
M	NÚMERO DE ENLACES RECEBIDOS OU DE SAÍDA EM UM NÓ
n	NÚMERO DE NÓS OU USUÁRIOS DA REDE
N	NÚMERO DE FIBRAS
p	PROBABILIDADE DE ENVIO DE PACOTES
P	CONJUNTO DE ROTAS ESPECIFICADAS PARA CAMINHOS ÓPTICOS
$P(G)$	GRÁFICO DOS CAMINHOS DE G
R	FATOR DE REUTILIZAÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA
W	NÚMERO DE COMPRIMENTOS DE ONDA

RESUMO

PEREIRA, H.A. Otimização de tráfego: Roteamento e critérios de proteção em redes ópticas. Santa Rita do Sapucaí, 2002. Instituto Nacional de Telecomunicações.

Os estudos das redes ópticas cada vez mais torna próximo o conceito de redes completamente ópticas. Esse conceito permite a transmissão, comutação e recepção dos sinais ópticos sem que seja necessário conversão de sinais ópticos para elétricos, fazendo com que as taxas de transmissão e a capacidade das redes atinjam valores superiores em relação aos estabelecidos nas redes atuais.

O propósito fundamental deste trabalho é abordar os principais métodos de roteamento e de proteção das redes ópticas, visando otimizar o desempenho, a confiabilidade e a relação custo-benefício dos enlaces ópticos.

Para um bom entendimento dos tópicos aqui apresentados, resultados teóricos fundamentais, envolvendo a teoria clássica das redes ópticas, serão ilustrados no decorrer do trabalho. Todos os resultados foram simulados com a mais eficiente plataforma computacional presente na atual literatura; o programa *VPItransportMaker*TM (VPIsystems Inc., Homdel, NJ, USA), que permite analisar o desempenho de uma rede óptica baseando-se em diferentes algoritmos de roteamento, de proteção, diferentes configurações de topologias e custos de equipamentos, apresentando critérios de otimização de redes.

Além disso, foram elaborados adicionalmente, alguns códigos fazendo uso de outra plataforma computacional largamente explorada na área de Engenharia Elétrica, MatLab (MathWorks, Natick, MA, USA), ilustrados através de simulações e emprego de alguns conceitos disponíveis na literatura das redes ópticas.

Palavras-Chave: Redes Ópticas, Roteamento Óptico, Proteção de Redes.

ABSTRACT

PEREIRA, H.A. Otimização de tráfego: Roteamento e critérios de proteção em redes ópticas. Santa Rita do Sapucaí, 2002. Instituto Nacional de Telecomunicações.

Nowadays, many researchers of optical networks concentrate their studies on how to achieve the implementation of all links in the network, by using only the optical domain. This concept allows the transmission, switching and reception of all optical signals without electronic conversion, and at the same time, increases the transmission speeds and the corresponding capacity of the network.

The main purpose of this work recalls a fundamental question that is: *How to use efficient routing and protection methods to optimize the networks performance, their trustfulness and cost-benefit relation.*

For a better understanding of the subject of this dissertation, some of the most important theoretical concepts involving the optical networks will be presented here. All the simulations were carried out by using an efficient numerical platform, which is the *VPItransportMaker™* (VPIsystems Inc., Homdel, NJ, USA). This is the most important tool to realize all kinds of analysis done in this work. The software allows the analysis of the performance of an optical network configured with a wide variety of structured architectures merged in generic topologies.

Furthermore, some original codes are generated by using another computer platform largely explored in the fields of the Electrical Engineering, which is the MatLab (MathWorks USA).

Keywords: Optical Networks, Optical Routing, Networking Protection.

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

Em meados dos anos setenta, renomados centros de pesquisa encontraram utilização prática para as fibras ópticas através dos sistemas de transmissão ponto a ponto. Esses sistemas apresentavam grande atenuação, resultando em comprimentos de percurso reduzidos. Com o aprimoramento das técnicas de transmissão, a descoberta de novas tecnologias e o trabalho conjunto de um grande número de pesquisadores, as primeiras redes ópticas começaram a ser implantadas na prática. Hoje as fibras compreendem um meio fascinante na transmissão de informações, cobrindo grandes distâncias e interligando continentes com taxas de transmissão superiores às encontradas nos sistemas que utilizam outros meios para o transporte de informações, como o cabo de cobre e o meio atmosférico por exemplo.

A utilização de técnicas como multiplexação por divisão do tempo (TDM – *Time Division Multiplexing*) e multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*), contribuiu consideravelmente para aumentar a capacidade de transmissão de dados na fibra de cerca de 1 Gb/s para até 40 Gb/s. A TDM a nível eletrônico era considerada como fator fundamental no aumento da velocidade de transmissão, sendo atualmente um objetivo a ser ultrapassado. A utilização das técnicas WDM e multiplexação por divisão do tempo a nível óptico (OTDM – *Optical Time Division Multiplexing*) requer que o processamento eletrônico seja reduzido com a intenção de se elevar ainda mais as taxas de transmissão e utilizar a capacidade das fibras de maneira mais eficaz. Utilizando a técnica de elevada multiplexação de comprimentos de onda (DWDM – *Dense Wavelength Division Multiplexing*), muitos deles podem ser transmitidos na fibra, fazendo com que taxas de transmissão atinjam valores de Tb/s em pesquisas atuais.

Em taxas de transmissão superiores a 2,5 Gb/s, verifica-se que os equipamentos eletrônicos não podem ser utilizados devido à complexidade adicionada ao sistema, necessidade de transparência no transporte do tráfego da rede e impossibilidade de manipulação de taxas de transmissão elevadas pelos respectivos componentes. Devido a esses termos e ao encarecimento e limitação do processo de reverter sinais ópticos para a forma eletrônica, avaliação dos dados, revertendo-os novamente para a forma óptica, em taxas de transmissão superiores a 2,5 Gb/s, torna-se necessário o emprego de redes completamente ópticas.

Nessas redes, uma vez que o sinal óptico foi transmitido por um nó, ao longo de sua rota, todo o processo de seleção, decisão, adição, remoção de dados e comutação, devem ser realizados no domínio óptico com o intuito de utilizar cada vez mais taxas de transmissão superiores a dezenas de Gb/s e transmitir mais informações no sistema.

O processo de controle do sistema e os mecanismos de roteamento, nas redes ópticas atuais, baseiam-se na utilização da eletrônica, ou seja, os dados ópticos precisam ser convertidos para elétricos, viabilizando a análise dos sinais que estão sendo transportados, e posteriormente convertidos para ópticos, de modo a possibilitar o fluxo de informações na rede. Essa tecnologia é muito utilizada, oferecendo taxas de transmissão que atingem centenas de Gb/s, sendo Sonet (*Synchronous Optical Network*) e SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) alguns dos tipos de redes que seguem estas características.

Através de processos de roteamento e mecanismos de proteção eficientes, consegue-se uma melhor utilização e aproveitamento das redes ópticas, fazendo com que a informação possa ser manipulada da melhor forma possível e que a confiabilidade do sistema atinja valores expressivos [1] [9] [12].

1.1. APLICAÇÕES

Encontra-se grande aplicação das redes ópticas em redes de áreas metropolitanas (MAN – *Metropolitan Area Network*) e redes distribuídas geograficamente (WAN – *Wide Area Network*).

Conforme citado anteriormente, aplica-se as tecnologias Sonet/SDH como uma das plataformas principais de transporte, assim como outras tecnologias referentes ao transporte de informações na camada superior conforme o modo de transferência assíncrono (ATM – *Asynchronous Transfer Mode*).

Pode-se também encontrar tecnologia óptica em vias de informações (*backbones*), trafegando altas taxas de dados, quase sempre interligando continentes.

Pesquisas atuais enfocam a utilização das aplicações ópticas em redes de área local (LAN – *Local Area Network*), onde empresas serão favorecidas com os novos padrões de tecnologia e a chegada desta nas residências e escritórios caracterizará um fornecimento de alta largura de faixa ao usuário final [5] [9].

1.2. OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho visa ilustrar as características dos sistemas ópticos, analisando a tecnologia de redes como característica principal, enfatizando a importância e os modelos de roteamento, esquemas de proteção, sua utilidade no conceito de redes, bem como seus diferentes tipos de configuração e simulações com o intuito de sistematizar as informações disponibilizadas. A proposta principal deste trabalho é contribuir para um melhor esclarecimento e fornecer as informações adicionais desse interessante assunto da tecnologia atual.

1.3. CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação consiste de três partes: A primeira, que corresponde aos capítulos que abordam o histórico das redes ópticas, os critérios de roteamento e proteção adotados e a utilização de protocolos para otimizá-los. A segunda ilustra os conceitos discutidos na primeira parte através de simulações com a plataforma computacional adotada, apresentando as configurações, os critérios utilizados e análises dos respectivos resultados. E a terceira que destaca algumas tendências dessas redes, visando demonstrar sua importância no contexto atual e enfatizar o caráter essencial deste conhecimento para as futuras aplicações.

CAPÍTULO II

2. REDES ÓPTICAS - INTRODUÇÃO, VARIAÇÕES E TOPOLOGIAS

2.1. AS REDES NAS TELECOMUNICAÇÕES

Classificam-se como redes privadas, onde os equipamentos e enlaces são de domínio privado, dentre estas podemos citar: As LANs, MANs e WANs; e redes públicas, onde as operadoras de telecomunicações operam as redes fornecendo serviços a outros usuários, destacando as centrais (*central office*), as redes de acesso, de intercâmbio local e de longas distâncias. Os conceitos apresentados são ilustrados na Figura 2.1.

Existem também as redes intercontinentais que conectam diversos países com cabos de fibras ópticas submarinos, cujo comprimento, na maioria das vezes, atinge milhares de quilômetros [1].

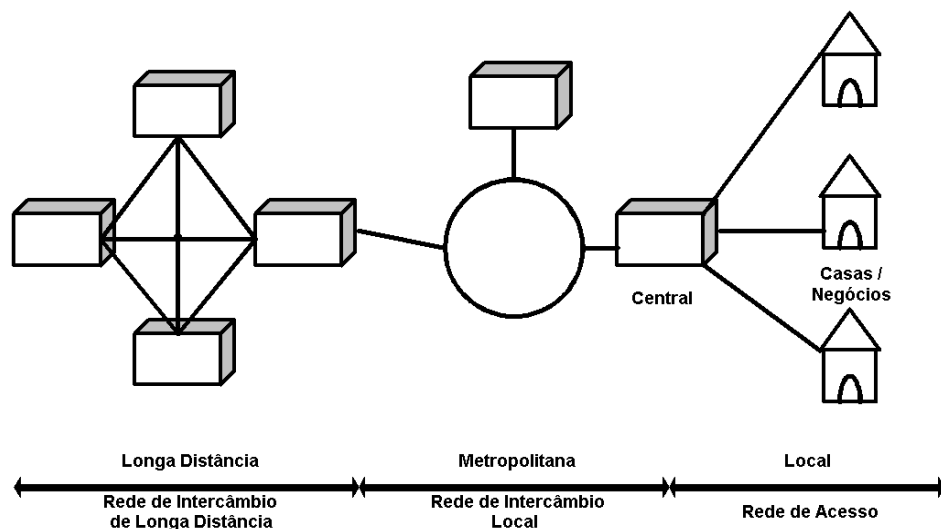


Figura 2.1 – Tipos de redes nas telecomunicações

2.2. A PRIMEIRA GERAÇÃO DAS REDES ÓPTICAS

Nessa geração, a fibra óptica é utilizada como meio de transmissão, servindo como substituição ao cabo de cobre, e todo o processamento e comutação dos dados são manipulados por equipamentos eletrônicos. Sonet, SDH e FDDI (*Fiber Distributed Digital Interface*), são alguns exemplos dessa geração de redes [1] [5].

2.3. A SEGUNDA GERAÇÃO DAS REDES ÓPTICAS

Nos últimos anos, as pesquisas têm convergido na direção de que as redes ópticas podem comportar outras funções além da transmissão ponto a ponto. Conseguem-se mais vantagens em incorporar funções de comutação e roteamento a nível óptico, visto que com taxas de transmissão superiores a 2,5 Gb/s, os equipamentos eletrônicos tornam-se bem mais complexos e limitados para o processamento dos dados [1].

Visando conhecer o papel dessas redes, é importante destacar os tipos de serviços que elas podem oferecer em potencial aos seus usuários. Para isso é útil propor que elas constituem a camada óptica, oferecendo serviços às camadas mais altas da rede.

Qualquer rede pode ser dividida em várias camadas, cada uma executando diferentes possíveis funções. Dessa forma, a camada óptica pode oferecer três tipos de serviços às camadas mais altas: [16] [17]

- **Caminho Óptico:** É uma conexão entre dois nós, no qual em cada enlace de uma rota, pode ser atribuído um comprimento de onda diferente ou não. Dependendo da capacidade da rede, pode ser configurado ou retirado sob pedido da camada superior. Um caminho óptico é um canal com largura de faixa bem maior que a utilizada em sistemas de telefonia, transportando dados com taxas de transmissão que atingem dezenas de Gb/s.

- **Circuito Virtual:** A rede oferece uma conexão comutada a circuito entre dois nós. Entretanto, a largura de faixa oferecida na conexão pode ser menor do que a disponível em um enlace ou comprimento de onda.

Desse modo a rede deve incorporar alguma forma de TDM visando combinar múltiplos circuitos virtuais em um comprimento de onda nos enlaces WDM ou em uma taxa de bit no caso de enlaces OTDM. Um circuito virtual representa uma conexão ponto a ponto com um certo conjunto de parâmetros de qualidade de serviço associados a ele, tal como largura de faixa e taxa de erro.

- **Serviço de Datagrama:** Permite que pequenos pacotes, ou mensagens de informação, sejam transmitidos entre os nós da rede sem o propósito de configurar conexões exclusivas.

A camada física apresenta mecanismos mais sofisticados, além de fornecer enlaces de fibra óptica ponto a ponto, que podem empregar quantidade variável de largura de faixa entre pares de nós, fornecer caminhos ópticos para a camada superior.

Uma das maiores características destas redes é que o caminho óptico, uma vez configurado, pode ser transparente aos dados que estão sendo transmitidos. Isto é, uma vez que a taxa de bit ou largura de faixa máxima, referente ao comprimento de onda, foi especificada, a rede pode transmitir dados em taxas inferiores ao limite, permitindo também o transporte de diferentes formatos de protocolo. Se o sinal permanece óptico, desde sua fonte até seu destino, um alto grau de transparência pode ser obtido. Entretanto, em alguns casos, o sinal pode não permanecer na forma óptica e pode precisar de regeneração. Isso envolve converter o sinal óptico para elétrico e vice-versa. A presença desses regeneradores eletrônicos no caminho do sinal reduz a sua transparência.

O motivo de existirem múltiplas camadas na rede, executando funções similares, é que dessa forma se reduz os custos dos equipamentos na rede. Diferentes camadas são mais eficientes em executar funções em diferentes taxas de transmissão. Portanto, utiliza-se a camada óptica para processar uma maior largura de faixa, referente às taxas de transmissão transmitidas em um comprimento de onda, enquanto que a camada superior possui a tarefa de processar uma menor largura de faixa, o qual representa as taxas de transmissão inferiores que são multiplexadas na transmissão em um comprimento de onda [1] [16] [17].

Uma observação similar também equivale para a função de recuperação do serviço, o qual representa uma forma de transporte de informações ao longo da rede mesmo na presença de falhas, de modo que certas falhas são melhor manipuladas pela camada óptica, e outras, pela superior.

Uma característica interessante da segunda geração é que, em muitos casos, elas transportam tráfego pertencendo às redes ópticas da primeira geração e protocolos distintos utilizados pelas diferentes camadas da rede.

Cada um desses protocolos necessita que determinadas funções sejam executadas por camadas específicas das redes da segunda geração. O fato de todos esses diferentes protocolos existirem, sendo muito difundidos, motiva a necessidade de redes ópticas transparentes [1] [3] [6] [9] [16] [17].

2.3.1. ARQUITETURA DE UMA REDE WDM

Utilizando a técnica de multiplexação WDM, pode-se elaborar e projetar redes possuindo arquiteturas classificadas nas seguintes categorias: Transmissão e seleção, e roteamento de comprimento de onda.

2.3.1.1. ARQUITETURA DE TRANSMISSÃO E SELEÇÃO

As duas topologias mais populares são as topologias em estrela e em barramento ilustradas na Figura 2.2. Ambas utilizam acopladores ópticos, onde diferentes nós transmitem sinais em comprimentos de onda distintos. Esses sinais são transmitidos por um dispositivo passivo para todos os nós da rede, onde cada nó possui um filtro óptico ajustável (filtros Fabry-Perot ou acústico-ópticos) para selecionar o comprimento de onda desejado [1]. O número de nós é limitado devido ao fato dos comprimentos de onda não serem reutilizados ao longo da rede, e da potência transmitida por um nó ser dividida entre todos os receptores. As duas topologias diferem no número e na maneira em que os acopladores são utilizados. Uma rede em barramento com n nós utiliza $2n$ acopladores 2×2 , enquanto que a rede estrela utiliza $\frac{n}{2} \log_2 n$ acopladores 2×2 . Uma comparação em relação ao número de acopladores utilizados entre as duas topologias é ilustrada na Figura 2.3 [1] [6].

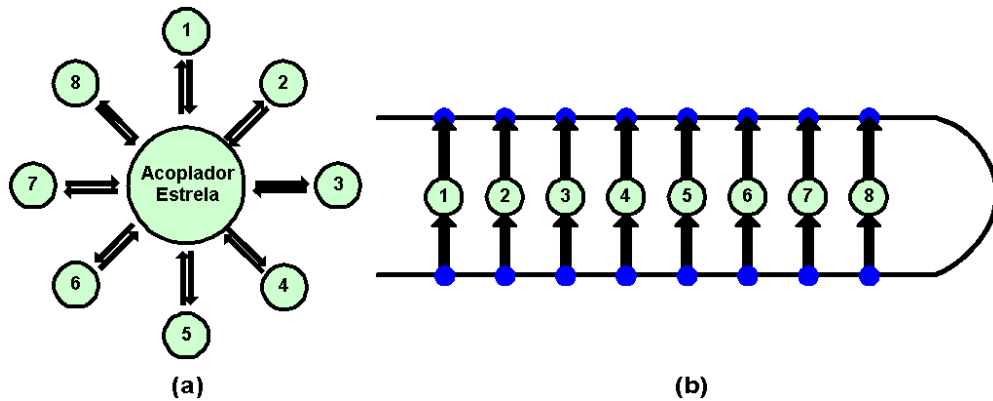


Figura 2.2 – Configuração da rede de transmissão e seleção em (a) estrela e (b) barramento

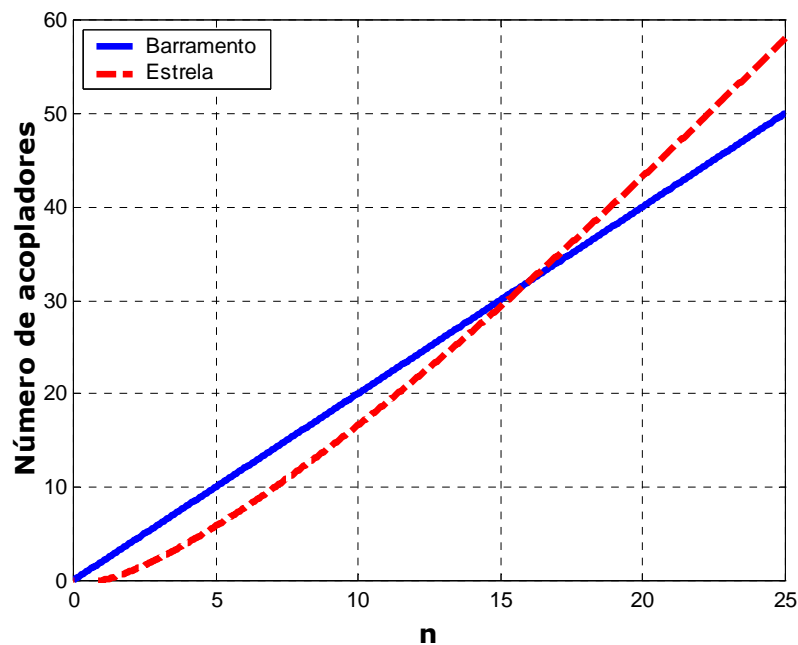


Figura 2.3 – Comparação entre as redes estrela e barramento quanto ao número de acopladores utilizados

2.3.1.2. ARQUITETURA DE ROTEAMENTO DE COMPRIMENTO DE ONDA

É mais prática e sofisticada, onde os nós são capazes de realizar o roteamento de comprimentos de onda distintos de uma porta de entrada para portas de saída diferentes. Isso habilita a configuração de caminhos ópticos simultâneos utilizando o mesmo comprimento de onda, ou seja, permite capacidade de reutilização espacial. A configuração desse tipo de rede é ilustrada na Figura 2.4 [1] [3].

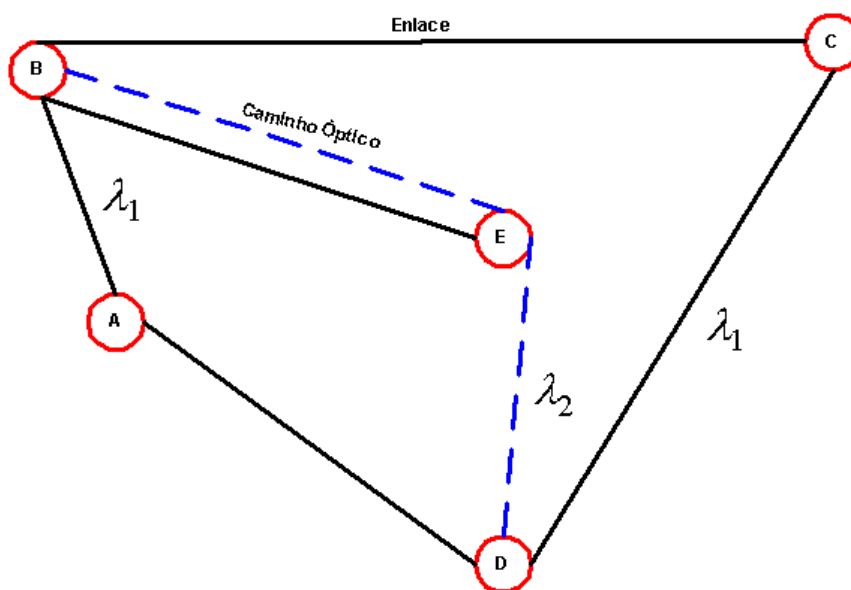


Figura 2.4 – Rede de roteamento de comprimento de onda

2.3.2. PROTOCOLOS DE CONTROLE DE ACESSO AO MEIO

Nas redes ópticas de transmissão e seleção, qualquer sinal transmitido por um nó é recebido por todos os nós, e cada nó deve selecionar o sinal desejado entre um conjunto de sinais transmitidos simultaneamente.

Se dois nós transmitem no mesmo comprimento de onda simultaneamente, devido à natureza de transmissão da rede, os sinais colidem e ambos serão extraviados, impossibilitando o nó receptor de receber algum deles. Se é efetuada a transmissão simultânea em comprimentos de onda diferentes para o mesmo receptor, sendo este ajustável, ele poderá receber somente uma das transmissões. Nesse caso, as duas transmissões sofrerem um fenômeno chamado de contenção.

Para resolver contenções e evitar, ou minimizar, colisões dispendiosas, alguma coordenação é exigida entre os vários nós da rede. O mecanismo que fornece essa coordenação é chamado de protocolo de controle de acesso ao meio (MAC – *Media Access Control*).

O *throughput* de uma rede é a fração da capacidade de transmissão que transporta dados úteis, ou seja, dados que são recebidos com sucesso pelos seus destinos pretendidos. Em redes com característica de transmissão e seleção, alguns dos dados transmitidos são extraviados devido às colisões ou contenções.

Protocolos MAC são projetados dependendo da necessidade da aplicação, dos transmissores e receptores (*hardware*) presentes nos nós, e do grau de desempenho exigido. Sendo este medido pelos atrasos dos pacotes e pelo *throughput* da rede.

Existe um compromisso entre o desempenho de um protocolo e a sua complexidade de implementação, incluindo o *hardware* que tem de ser utilizado em cada nó.

Os protocolos de comutação de pacotes, descritos neste trabalho, utilizam um comprimento de onda exclusivo, chamado de canal de controle, para enviar informações sobre os pacotes que serão transmitidos nos canais de dados. O canal de controle pode ocupar um comprimento de onda exclusivo, ou utilizando a técnica TDM, compartilhar os mesmos comprimentos de onda que os canais de dados. Dentre os protocolos, os seguintes podem ser citados:

2.3.2.1. PROTOCOLO SLOTTED ALOHA / SLOTTED ALOHA (SA/SA)

Neste protocolo, o número W de comprimentos de onda é bem inferior ao número n de nós da rede. Estes comprimentos de onda são utilizados para transmitir os dados, existindo um $(W + 1)$ comprimento de onda com o propósito de controle.

Exige ainda que cada nó seja equipado com um transmissor e um receptor ajustáveis para os dados e um transmissor e um receptor fixos no comprimento de onda de controle.

No protocolo *Aloha*, qualquer nó que tenha um pacote para enviar, transmite-o imediatamente. No *Slotted Aloha*, o tempo é dividido em intervalos cuja duração é igual ao tamanho máximo do pacote. Um nó que tenha um pacote para transmitir envia-o imediatamente no intervalo seguinte. Se nenhuma outra transmissão se sobrepõe a ela, os dados são recebidos com sucesso. Caso contrário, ocorre uma colisão e os nós envolvidos retransmitem seus pacotes após um intervalo de tempo aleatório.

Para redes multicanaís, o protocolo básico *Slotted Aloha/Slotted Aloha* opera da seguinte maneira: Quando um nó tem um pacote de dados para enviar, ele envia um pacote de controle no intervalo de controle e imediatamente um pacote de dados no intervalo de dados seguinte.

O pacote de controle é enviado no $(W + 1)$ comprimento de onda de controle, e o pacote de dados em um dos $1, \dots, W$ comprimentos de onda de dados. O pacote de controle transporta a identidade do nó receptor e a identidade do comprimento de onda no qual o pacote de dados será transmitido. Cada nó, continuamente, monitora o canal de controle.

Desse modo, visto que outro nó não transmitiu um pacote de controle no respectivo intervalo, o nó receberá o pacote de controle e saberá que no próximo intervalo, um pacote de dados será enviado em um dado comprimento de onda. O nó receptor, então, ajusta-se ao respectivo comprimento de onda e tenta receber o pacote de dados. A tentativa será bem sucedida caso nenhum outro pacote de dados colida ou sofra contenção com ele.

Esse protocolo apresenta uma característica conhecida na atual literatura como *tell-and-go*, ou seja, uma vez que um pacote está disponível para transmissão em um nó, a programação deste comunica aos outros nós da rede sobre esse pacote no intervalo de controle e o transmite no próximo intervalo de dados.

O atraso de acesso é um parâmetro de medida do desempenho nessas redes, sendo definido como o intervalo de tempo em que um pacote está disponível para transmissão e o momento em que ele é transmitido.

Protocolos com a característica *tell-and-go* apresentam atraso de acesso com valores próximos de zero. É desejável ter um atraso de acesso reduzido por duas razões:

- Algumas aplicações podem não ser capazes de tolerar grandes atrasos.
- Devido às altas velocidades de transmissão, nas redes ópticas, um atraso de acesso elevado resultará em maiores exigências de armazenamento nos nós de transmissão.

Caso algum outro nó, z por exemplo, também transmitir um pacote de controle no mesmo intervalo que o nó x , o nó y não será capaz de receber o pacote de controle do nó x . Mesmo se o pacote de dados não colidir com nenhum outro pacote, o nó y não tomará conhecimento da transmissão desse pacote. Por isso, para que o pacote de dados seja recebido com sucesso, ambos os pacotes de controle e de dados devem ser livres de colisão.

Se o nó x possuir mecanismos que determinem a ocorrência da colisão do pacote de controle, ele pode evitar a transmissão dispendiosa do pacote de dados.

Alterando o protocolo, de modo que o pacote de dados seja transmitido só depois do nó transmissor receber um retorno que o pacote de controle foi recebido com sucesso, resulta tanto em um valor de *throughput* maior, como de atraso de acesso também. Esse tipo de característica é denominado de *wait-and-see*. Os resultados de uma simulação comparando os valores de *throughput* das características *tell-and-go* e *wait-and-see* em relação à variação (g), que representa a probabilidade de envio de pacotes multiplicada pelo número de nós da rede (n), são ilustrados na Figura 2.5 e na Figura 2.6.

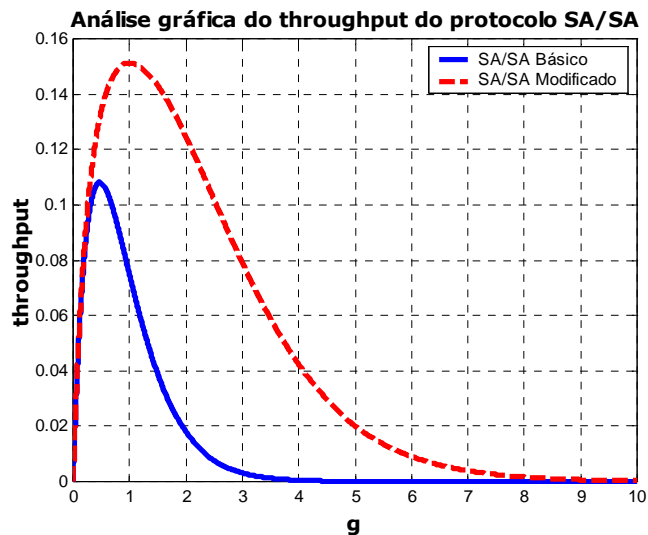


Figura 2.5 – Comparação dos valores de *throughput* dos protocolos SA/SA básico e modificado

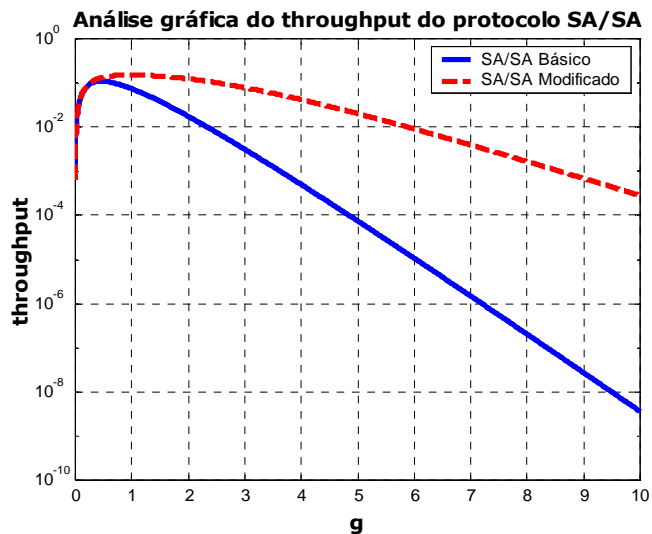


Figura 2.6 – Gráfico semilog dos valores de *throughput* dos protocolos SA/SA básico e modificado

2.3.2.2. PROTOCOLO DT-WDMA

Neste protocolo o número de nós é igual ao número de comprimentos de onda que são utilizados para transmissão dos dados. Além disso, existe um $(W + 1)$ comprimento de onda de controle.

Exige ainda que cada nó seja equipado com um transmissor de dados fixo em um único comprimento de onda e um receptor ajustável. Cada nó também deve ter um transmissor e um receptor de controle fixos no comprimento de onda de controle.

A Figura 2.7 ilustra uma estrutura, onde os intervalos de controle estão divididos em intervalos com menor duração, em relação ao intervalo de dados, apresentando uma correspondência biunívoca com o número de nós da rede.

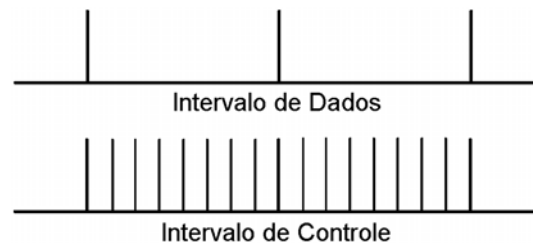


Figura 2.7 – Estrutura do intervalo de dados e de controle do protocolo DT-WDMA

Quando um nó apresenta um pacote de dados para transmitir, ele envia um pacote de controle, no intervalo de controle, e o pacote de dados, imediatamente no intervalo de dados seguinte. O pacote de controle é enviado no $(W + 1)$ comprimento de onda e o pacote de dados no comprimento de onda atribuído ao nó.

O pacote de controle transporta a identidade do nó receptor e o intervalo de controle, no qual ele é transmitido, identifica o comprimento de onda no qual o pacote de dados será transmitido. Portanto, o nó y receberá o pacote de controle, enviado pelo nó x , aguardando no próximo intervalo um pacote de dados, que foi transmitido no comprimento de onda λ_x . Desse modo, o nó y ajusta seu receptor para λ_x e recebe o pacote de dados. Desde que cada nó transmite seus pacotes de dados em comprimentos de onda diferentes, os dados nunca sofrerão colisão.

O mesmo fenômeno ocorre devido a cada nó transmitir seus pacotes de controle em intervalos diferentes. Entretanto, dois ou mais nós podem transmitir pacotes de dados simultaneamente para o mesmo nó receptor, o qual só poderá receber um desses pacotes que sofrerá contenção.

O algoritmo utilizado pelo nó receptor para resolver contenções, determina o pacote de dados a ser recebido entre aqueles pretendidos em toda a topologia da rede. Portanto, os nós transmissores, cujos pacotes não foram escolhidos pelo nó receptor, podem transmitir os pacotes de dados novamente.

Quando é considerado que todos os nós estejam saturados, ou seja, que cada nó tenha um pacote de dados para transmitir em cada intervalo, o *throughput* desse protocolo vale aproximadamente 0.632, apresentando um valor bem superior ao obtido com os protocolos SA/SA básico e modificado [1]. É ilustrado graficamente na Figura 2.8 e na Figura 2.9 os resultados de uma simulação referente aos valores de *throughput* desse protocolo em relação à probabilidade de envio de pacotes (p).

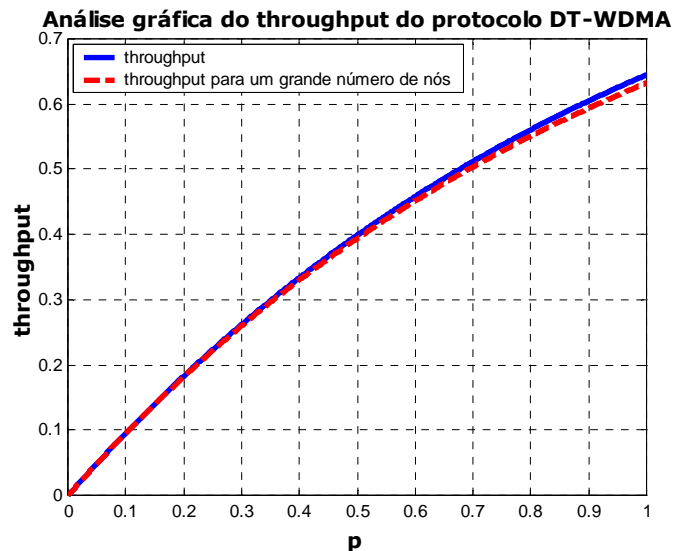


Figura 2.8 – Valores de *throughput* do protocolo DT-WDMA

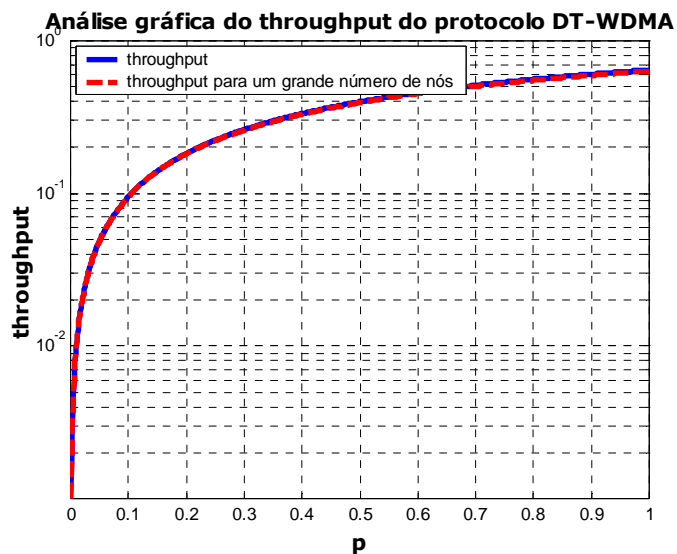


Figura 2.9 – Gráfico semilog dos valores de *throughput* do protocolo DT-WDMA

2.3.2.3. PROTOCOLOS DE ORGANIZAÇÃO

Apresenta os mesmos requisitos quanto à estrutura dos intervalos de dados e de controle, bem como as exigências do *hardware* dos nós, utilizados no protocolo DT-WDMA.

Operam da seguinte forma: Um nó envia um pacote de controle, no seu intervalo de controle atribuído, assim que tiver disponível um novo pacote para transmissão, anunciando o nó destino para esse pacote mas não enviando o pacote de dados imediatamente.

A arquitetura da rede está estruturada de modo que o nó transmissor possa identificar quais outros nós possuem pacotes para transmitir ao mesmo destino. Com essa informação, todos os nós, que tiverem pacotes para enviar ao mesmo nó, organizam suas transmissões em intervalos de dados diferentes, fazendo com que eles nunca sofram contenções.

Dependendo da forma que a organização for realizada e do tipo de algoritmo utilizado, podem ser encontrados valores próximos do valor unitário para o *throughput* da rede.

Ao considerar o desempenho de vários protocolos MAC, foi discutido somente seus valores de *throughput*, embora exista um compromisso entre eles e o atraso de acesso. Portanto, o protocolo de organização atinge um valor de *throughput* próximo da unidade comparado ao valor de 0.632 do DT-WDMA, porém existe a desvantagem no aumento do atraso de acesso [1] [6] [7] [8].

2.3.3. CLASSES DE TRÁFEGO E ESCALABILIDADE

Um inconveniente de todos os protocolos considerados até o momento é que a informação de controle é transmitida para todos os nós. Isso resulta em uma sobrecarga computacional desnecessária, visto que todo nó tem que processar todos os pacotes de controle, podendo gerar um grande congestionamento em redes com um número maior de usuários. Em outras palavras, esses protocolos não são escaláveis, do ponto de vista computacional, com o tamanho da rede, de modo a acompanhar sua evolução.

Outro problema relaciona-se com a noção das classes de tráfego. Isso porque uma rede pode ser idealizada como permitindo a utilização de três tipos diferentes de classes de tráfego, tais como:

- **Classe 1 (Conexão orientada com largura de faixa garantida):** Corresponde ao tráfego de aplicações que são sensíveis a atrasos e não toleram retransmissões.
- **Classe 2 (Conexão orientada sem nenhuma garantia de largura de faixa):** Corresponde ao tráfego de aplicações cuja conexão é garantida, mas não são sensíveis a atrasos.
- **Classe 3 (Sem conexão):** Corresponde ao tráfego de aplicações como mensagens de controle ou e-mail, onde esse tipo de tráfego é geralmente chamado de datagrama.

Desse modo, todos os protocolos, considerados até este ponto, foram projetados para operar apenas datagramas.

A arquitetura computacional é projetada com o intuito de possuir n canais de controle em uma rede de n nós e adequadamente desenvolver o protocolo de modo que cada nó visualize os pacotes em somente um canal de controle.

Existem n canais de dados, um por nó da rede, como no protocolo DT-WDMA. Se os n canais de controle são implementados em comprimentos de onda exclusivos, o protocolo exige $2n$ comprimentos de onda. Os n canais de controle podem também ser multiplexados no tempo com os n canais de dados de modo que somente n comprimentos de onda são necessários, o que resulta em uma redução na utilização dos canais de dados [1] [9].

CAPÍTULO III

3. ROTEAMENTO DE COMPRIMENTO DE ONDA - TIPOS DE REDES E ALGORITMOS UTILIZADOS

3.1. REDES DE ROTEAMENTO DE COMPRIMENTO DE ONDA

Uma grande vantagem do roteamento de comprimento de onda (RCO) é obtida quando se permite que o tráfego seja roteado na camada inferior. Isso resulta em significativa economia na camada superior, em termos de regenerador adicionado, porta do comutador e custos de processamento.

A rede RCO, em geral, consiste de nós roteadores de comprimento de onda (WXC – *Wavelength Crossconnect*) conectados por enlaces de fibra, sendo responsáveis por extrair, inserir e comutar os comprimentos de onda dos nós [1] [3].

Cada enlace pode comportar um certo número de comprimentos de onda dependendo das limitações impostas aos componentes e à transmissão. A rede constitui a camada óptica na hierarquia das camadas, fornecendo caminhos ópticos para a camada superior. Algumas características das redes ópticas são discutidas em relação aos seguintes aspectos:

- **Transparência:** Refere-se ao fato de que os caminhos ópticos podem transportar dados em uma variedade de taxas de bit e protocolos, podendo de fato, serem insensíveis a protocolos, fazendo com que a camada óptica possa realizar o transporte do tráfego de uma variedade de camadas mais altas simultaneamente [5] [12] [15].

- **Reutilização de Comprimento de Onda:** Embora o número de comprimentos de onda disponíveis possa ser limitado, a rede pode ainda aumentar sua capacidade, desde que estes possam ser reutilizados espacialmente na rede.

Portanto, o número de caminhos ópticos que a rede pode fornecer pode ser maior do que o número de comprimentos de onda disponíveis [1] [6] [24].

- **Confiabilidade:** A rede pode ser configurada de tal forma que no caso de falhas, caminhos ópticos podem ser roteados automaticamente através de caminhos alternativos, fornecendo um alto grau de confiabilidade para a rede [1] [5].

- **Topologia Virtual:** Refere-se à topologia sob o ponto de vista da camada superior, consistindo de conexão entre os nós caso exista caminho óptico entre eles [1] [27].

- **Comutação a Circuito:** Os caminhos ópticos fornecidos pela camada óptica podem ser configurados e retirados sobre demanda. Nenhuma comutação de pacotes é realizada na camada óptica, sendo executada exclusivamente pela camada superior [1].

3.1.1. GRAU DE TRANSPARÊNCIA

O grau de transparência oferecido por um nó pode variar. Uma implementação completamente óptica pode fornecer alto grau de transparência, isto é, insensibilidade a dados digitais/analógicos, taxas de bit e formatos de modulação. No outro extremo, uma implementação consistindo de um comutador eletrônico pode não oferecer nenhuma transparência.

O grau de transparência oferecido por um equipamento eletrônico depende do tipo de regeneração do sinal empregado em cada nó. Se a implementação é completamente analógica, ela pode oferecer quase o mesmo nível de transparência que a parte óptica (somente formato de modulação baseado em amplitude). Se a implementação é digital, esta não pode operar com o tráfego analógico, existindo três tipos de técnicas de regeneração para dados digitais:

- **3R (Regeneração com recuperação do *clock* e da forma do sinal):** Essa técnica reproduz uma cópia fiel do sinal, podendo este percorrer um grande número de regeneradores, o qual elimina a transparência na transmissão dos dados devido à recuperação do *clock* do sinal. Isso porque em um enlace óptico existem sinais distintos com taxas de transmissão diferentes e o uso desta técnica de regeneração restringe o tráfego dos sinais a uma mesma taxa de transmissão.

- **2R (Regeneração com recuperação da forma):** Oferece transparência a dados digitais mas não trabalha com dados analógicos ou formatos de modulação diferentes. Essa técnica limita os passos de regeneração, particularmente em taxas de transmissão superiores a 2,5 Gb/s, devido ao *jitter* acumulado em cada passo.

Jitter é um fenômeno que ocorre na transmissão de sinais digitais causando uma variação aleatória na fase do pulso transmitido, acarretando em uma distorção no pulso recebido. Nos sistemas ópticos, este fenômeno está relacionado com flutuações da fase da portadora [34] [35].

- **1R:** O sinal é recebido e retransmitido. Pode manipular dados analógicos mas seu desempenho é inferior às outras técnicas [1] [3] [5].

3.1.2. GRAU DE CONVERSÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA

A conversão de comprimento de onda pode representar um papel importante ao melhorar a utilização dos que se encontram disponíveis na rede, reduzindo assim, a taxa de bloqueio para pedidos de caminhos ópticos. Pode também ser útil quando é preciso configurar um caminho óptico através de múltiplos domínios administrados por operadores diferentes, que não coordenam suas atribuições de comprimentos de onda, ou quando é preciso conectar equipamentos de fabricantes diferentes que utilizam comprimentos de onda incompatíveis. Na ausência de conversão, deve ser atribuído o mesmo comprimento de onda em todos os enlaces ao longo da rota de um caminho óptico. Com conversão, podem ser atribuídos comprimentos de onda distintos em enlaces diferentes ao longo da rota [1] [2] [24].

A conversão de comprimento de onda pode ser realizada de três maneiras diferentes em relação a componentes e tecnologias utilizadas, são elas:

- **Optoeletrônica:** O sinal óptico é convertido para elétrico e retransmitido em outro comprimento de onda [1].

- **Ligação Óptica (*Optical Gating*):** Utiliza um dispositivo óptico cujas características variam com a intensidade do sinal de entrada. Essa variação pode ser transferida para outro sinal não-modulado em um comprimento de onda distinto na saída do dispositivo de conversão.

Nesse momento, o sinal contém a informação do sinal de entrada. A transparência oferecida por essa técnica é limitada pois somente sinais modulados em intensidade podem ser convertidos [1].

- **Mistura de Ondas (*Wave Mixing*):** Através desse efeito não-linear, o qual gera novas frequências de acordo com a intensidade e o número de comprimentos de onda na fibra, é possível realizar conversão de comprimento de onda. Apresenta a vantagem de ser transparente, independente do formato de modulação e da taxa de bit. Possui desvantagens em relação às frequências geradas que são desnecessárias ao processo de conversão e por causa da redução na eficiência da mistura de ondas devido a um maior espaçamento entre o comprimento de onda recebido e o transmitido na saída do dispositivo [1].

A capacidade de conversão em um nó pode ser caracterizada por um grau d de conversão, $1 \leq d \leq W$. Um comprimento de onda recebido pode ser convertido em d comprimentos de onda diferentes na saída. As técnicas de conversão podem ser:

- **Conversão Fixa:** Um sinal recebido com λ_I deve sempre deixar o nó com λ_J , independente das suas portas de entrada e saída. No caso sem conversão tem-se: $\lambda_I = \lambda_J$.
- **Conversão Completa:** Um sinal recebido com λ_I pode deixar o nó com qualquer λ_J .
- **Conversão Limitada:** Um sinal recebido com λ_I pode deixar o nó com qualquer λ_K , o qual pertença a um subconjunto de comprimentos de onda em que ele possa ser convertido.

Existe uma correlação entre o número de componentes que realizam a comutação e o grau de conversão exigido. Em geral, um certo grau de conversão é alcançado por utilizar uma combinação de comutadores e conversores de comprimento de onda. Desse modo, a conversão limitada reduz o número de comutadores e conversores em relação à conversão completa. As configurações dos nós em relação aos diferentes critérios de conversão utilizados em uma rede são ilustradas na Figura 3.1 [1] [24].

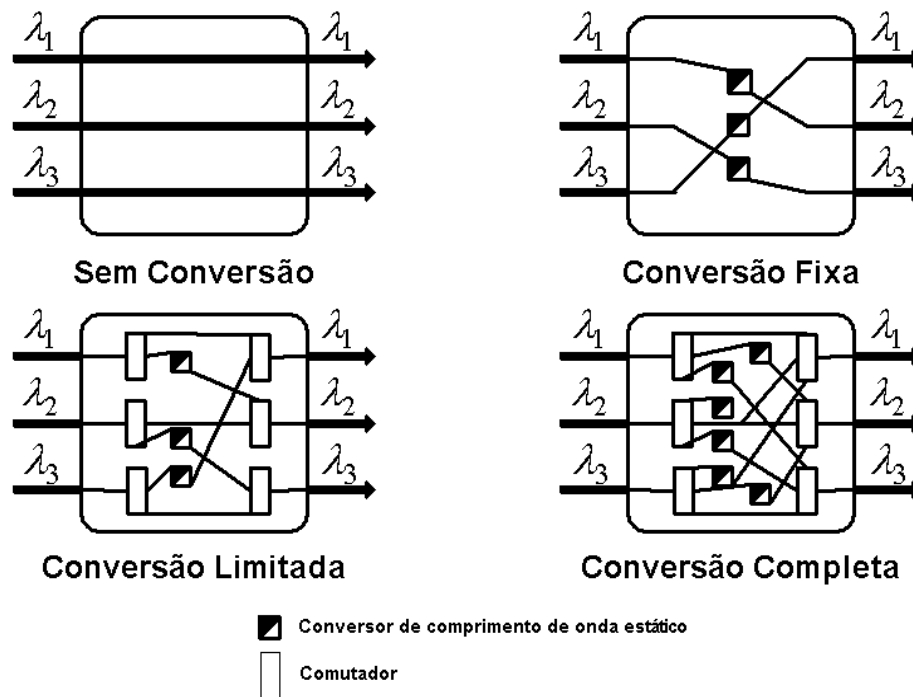


Figura 3.1 – Tipos de conversão de comprimento de onda

3.1.3. PROJETO DOS NÓS

O elemento chave na rede é o WXC. O nó tem portas tronco que o conectam a outros nós, portas tributárias ou locais, onde representam uma fonte ou destino do tráfego, o qual pode ser de origem óptica ou elétrica, além de um elemento gerenciador de rede que controla e gerencia o nó. Para o caso onde existem exatamente duas portas tronco, o nó é chamado de multiplexador de adição/remoção de comprimento de onda (ADM – Add/Drop Multiplexer). O diagrama em blocos de um WXC é ilustrado na Figura 3.2 [1] [24].

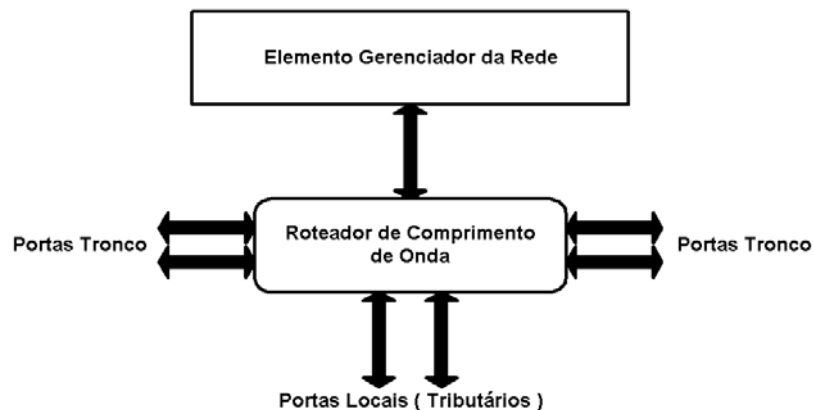


Figura 3.2 – Diagrama em blocos de um WXC

Os nós WXC's podem apresentar as seguintes configurações em uma rede óptica:

- **WXC Óptico sem Conversão:** Esta configuração permite que um comprimento de onda, em um enlace recebido, possa ser comutado para qualquer enlace de saída, independente dos outros comprimentos de onda. São utilizados: M multiplexadores, M demultiplexadores e W comutadores ópticos $M \times M$, conforme ilustrado na Figura 3.3.

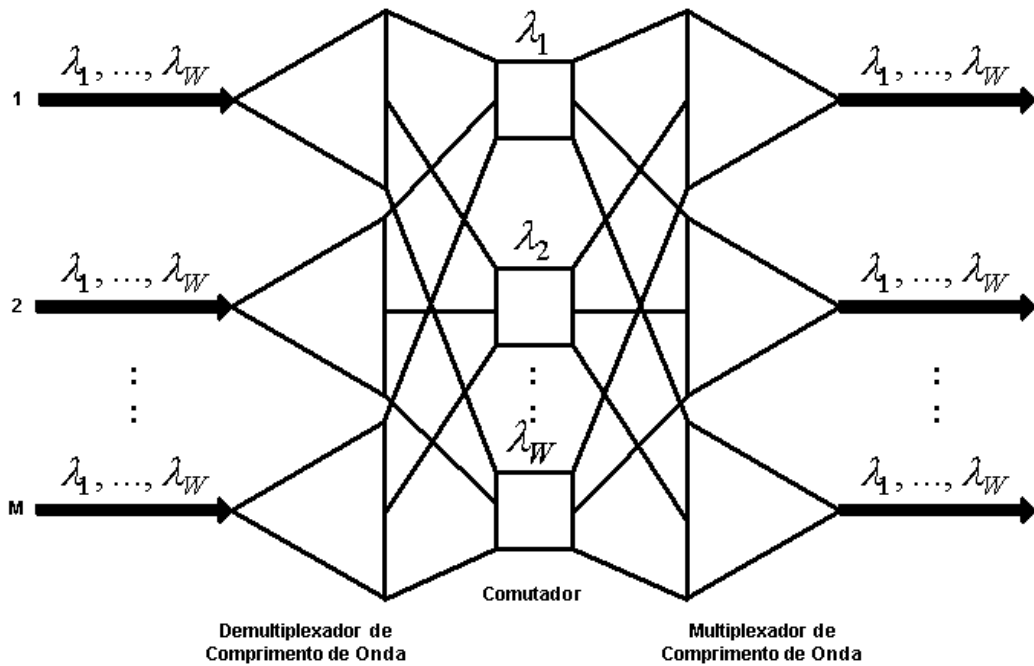


Figura 3.3 – WXC óptico sem conversão

- **WXC Óptico com Conversão Completa:** É capaz de comutar um comprimento de onda recebido para qualquer porta de saída em qualquer comprimento de onda. São utilizados: M multiplexadores, M demultiplexadores, 01 comutador óptico $WM \times WM$ e WM conversores de comprimento de onda, conforme ilustrado na Figura 3.4.

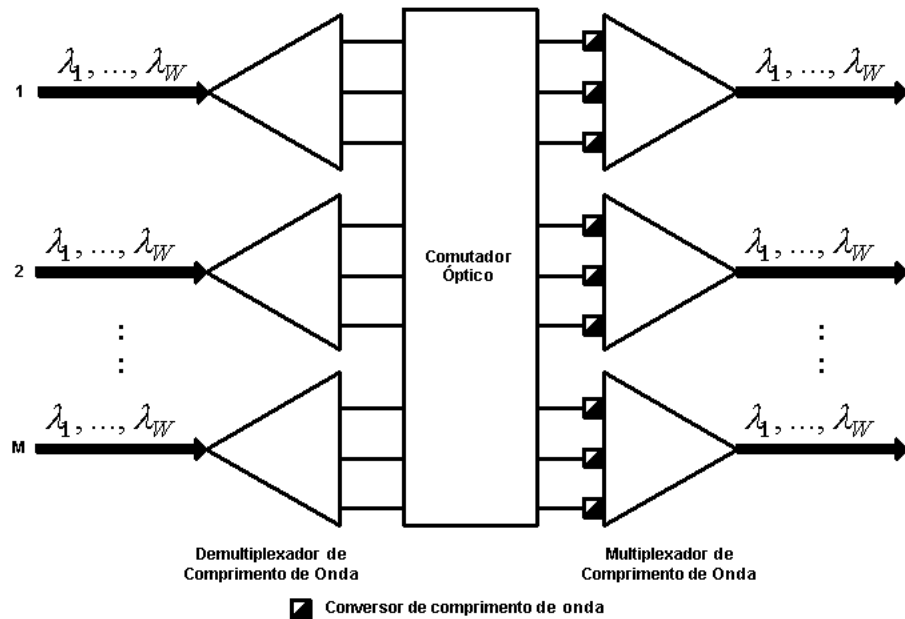


Figura 3.4 – WXC óptico com conversão completa

- **WXC Híbrido (Optoeletrônico):** Realizado através da utilização das tecnologias óptica e eletrônica. Está estruturado com: M multiplexadores, M demultiplexadores, 01 comutador eletrônico, lasers e receptores ópticos, conforme ilustrado na Figura 3.5. Uma comparação entre a opção óptica e a eletrônica é apresentada na Tabela 3.1 [1].

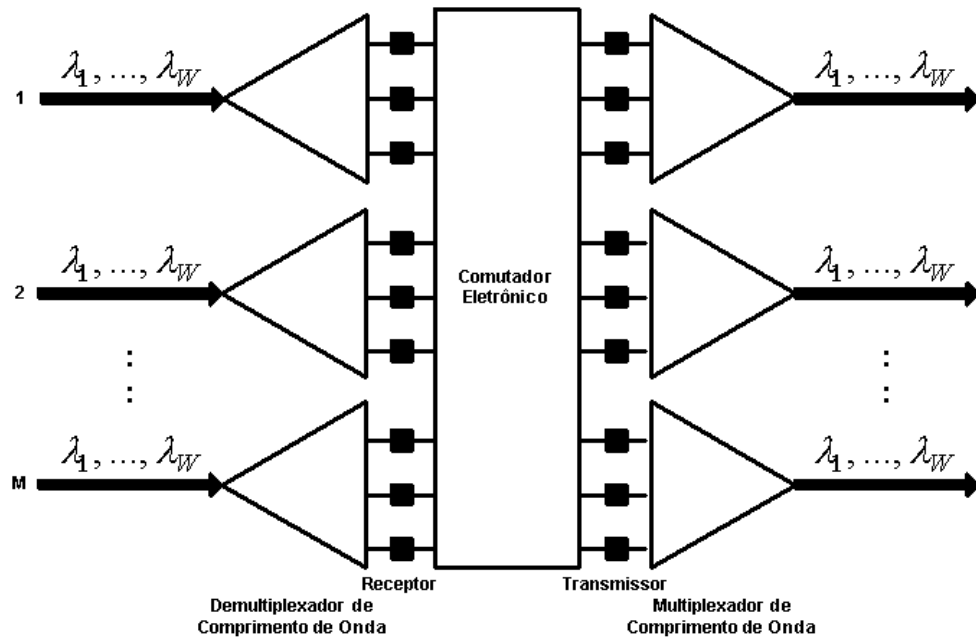


Figura 3.5 – WXC com comutação eletrônica

Tabela 3.1 – Comparação entre a aproximação óptica e a híbrida (optoeletrônica)

	WXC Óptico	WXC Eletrônico
Transparência	Sim	Difícil
Conversão de λ	Difícil	Mais Fácil
Taxa de Bit	> 10 Gb/s	≤ 2.5 Gb/s
Tamanho do Roteador	Pequeno	Maior
Projeto da Camada Física	Difícil	Mais Fácil
Monitoramento	Limitado	Extensivo
Componentes Necessários		
Multiplexador/Demultiplexador	Sim	Sim
Comutador Óptico	Sim	Não
Comutador Eletrônico	Não	Sim
Transmissores/Receptores	Não	Sim
Conversão de λ	Talvez	Não

3.2. MODELOS DE TRÁFEGO E CRITÉRIOS DE DESEMPENHO

Um dos primeiros passos no projeto de uma rede é saber qual o tipo de tráfego que deve ser transportado. Do ponto de vista da camada óptica, as demandas de tráfego são os caminhos ópticos entre os pares de nós. Muitos modelos diferentes têm sido utilizados com o propósito de descrever as demandas de tráfego para os caminhos ópticos.

Esses modelos são completamente distintos e refletem essa característica nos modos de operação, ocasionando em um critério de otimização substancialmente diferente para a rede. Cada um desses modelos tem seus prós e contras, e infelizmente, nenhum deles fornece um modelo real por completo.

Dependendo da natureza temporal da demanda, para os caminhos ópticos, seus pedidos podem ser classificados em duas categorias:

- **Online:** As demandas surgem uma de cada vez e cada caminho óptico deve ser fornecido sem esperar que futuras demandas tornem-se conhecidas. Caminhos ópticos existentes não podem ser roteados novamente para acomodar um novo pedido.

- **Offline:** Nesse caso é fornecido o conjunto completo dos caminhos ópticos que devem ser roteados. É equivalente ao caso *Online* com o adicional de poder realizar o roteamento de caminhos ópticos existentes caso novas demandas precisem ser atendidas.

A demanda pode ser para um caminho óptico permanente (não será retirado) ou não-permanente (permanecerá por algum tempo).

Outra questão importante é se existe a possibilidade de bloquear alguns caminhos ópticos (modelo bloqueante), ou se a rede deve atender todos os pedidos (modelo não-bloqueante).

Um bom projeto de rede leva em consideração manter a probabilidade de bloqueio dentro de um limite aceitável. É impossível projetar uma rede conhecendo demandas arbitrárias com recursos limitados. Portanto, geralmente são admitidas algumas propriedades para as demandas que podem surgir. Dependendo destas propriedades, o modelo pode refletir um modo de operação *Offline* ou *Online*, com ou sem bloqueio.

Os modelos de tráfego comumente empregados são os seguintes:

- **Matriz de Tráfego Fixa:** Nesse caso, o conjunto dos caminhos ópticos a ser configurado é fornecido na forma de uma matriz de tráfego, onde as demandas do tráfego total são conhecidas.

Isso pode refletir uma situação onde a rede está sendo projetada no tempo inicial de funcionamento, mas não refletirá a situação onde caminhos ópticos podem ser configurados ou retirados durante operação normal da rede.

Nesse caso, o objetivo de otimização desejado é o de minimizar o número de comprimentos de onda e/ou outros parâmetros relacionados com os equipamentos necessários para atender esse tráfego. Esse é um modelo *Offline* e não-bloqueante.

- **Permutação:** Nesse modelo de tráfego, é permitido ter no máximo um caminho óptico entre cada par de nós, e para cada nó é permitido fornecer/receber no máximo um caminho óptico. Então, quando todos os nós fornecem e recebem exatamente um caminho óptico, o conjunto dos caminhos ópticos destinados é uma permutação do conjunto dos caminhos ópticos fornecidos. Esse modelo é apropriado para caracterizar o tráfego em um comutador $n \times n$. A idéia principal desse modelo é que ele compreende uma variação maior de estados de tráfego.

Ele não é um modelo real para descrever as demandas dos caminhos ópticos, mas pode ser utilizado para derivar algumas exigências fundamentais de parâmetros importantes, tais como o número de comprimentos de onda, comutadores e conversores necessários à rede.

Esse modelo se aplica a ambos os casos *Offline* e *Online*.

- **Carga Máxima:** Nesse modelo, o tráfego é caracterizado por um parâmetro chamado de carga, sendo definido como o número máximo de caminhos ópticos simultâneos que podem estar presentes em qualquer enlace da rede.

É um parâmetro importante porque é dimensionado pelo número máximo de comprimentos de onda que estão disponíveis em um enlace, refletindo uma condição de medida da utilidade desses comprimentos de onda em um enlace da rede. A eficiência do transporte de sinais em uma rede está fortemente relacionada com a relação da carga que pode ser atendida pelo número de comprimentos de onda alocados. Esse modelo é tipicamente não-bloqueante.

O propósito principal é maximizar a carga para um dado número de comprimentos de onda alocados, assim como o número, a localização dos conversores e comutadores disponíveis. De maneira similar, o número de comprimentos de onda exigidos para atender uma determinada carga pode ser minimizado. Esse modelo se aplica a ambos os casos *Offline* e *Online*. Entretanto, ele admite que o roteamento dos caminhos ópticos já é especificado.

- **Modelo Estatístico:** Neste modelo, é desejável ter algum conhecimento das estatísticas de ambos os pedidos para estabelecimento e liberação do caminho óptico. É geralmente um modelo *Online* e bloqueante.

O modelo bloqueante tem sido aplicado para analisar o desempenho de redes ópticas, mas sua conveniência provoca dúvidas, devido ao fato que caminhos ópticos transportam dados em altas taxas de transmissão e são tipicamente configurados em uma base estabelecida. Ao invés de bloquear um pedido de caminho óptico, é provável que o operador adicione mais capacidade em uma rede para atendê-lo.

Quando os modelos não-bloqueantes são considerados, geralmente a rede é projetada conhecendo-se todas as demandas conforme o modelo assumido.

Além do mais, o projeto deve levar em consideração uma certa folga, se para uma dada carga, todas as demandas de tráfego possíveis devem ser atendidas sem bloqueio. Caso sejam exigidos recursos moderados da rede, a maioria desse grande conjunto de possíveis demandas de tráfego apresenta um bom comportamento, embora alguns casos possam exigir uma enorme quantidade de recursos.

A probabilidade de bloqueio é simplesmente o número de pedidos que são bloqueados, através de um longo intervalo de tempo, dividido pelo número de pedidos no intervalo. Ao invés de projetar a rede para alcançar uma certa probabilidade de bloqueio, pode ser mais apropriado projetá-la para maximizar o tempo antes que o primeiro evento de bloqueio ocorra.

Uma comparação entre uma rede estática para o caso ideal, *Offline* e *Online* em função do número de comprimentos de onda (W) necessários para atender as demandas de acordo com uma variação no número de usuários (n) é ilustrada na Figura 3.6 [1] [2] [3] [24].

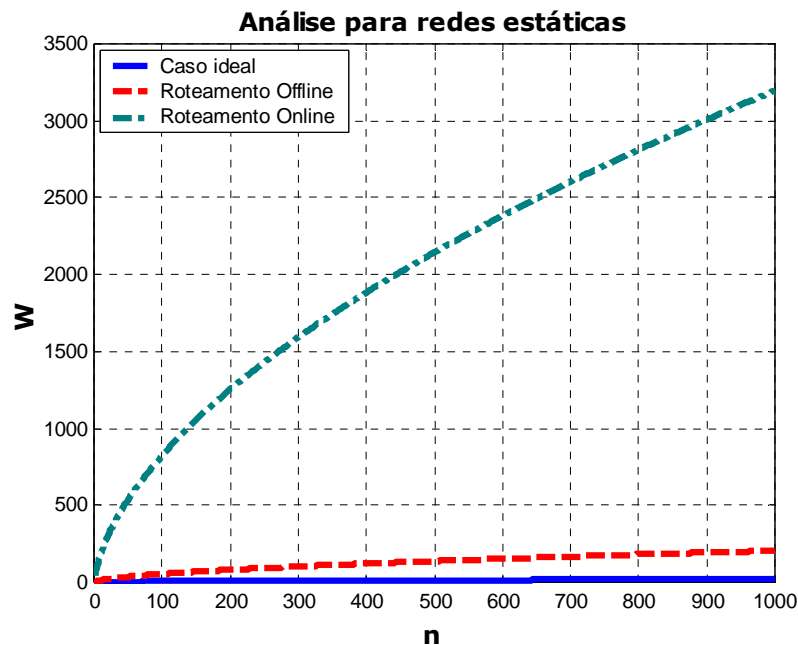


Figura 3.6 – Comparação entre o roteamento para o caso ideal, *Offline* e *Online*

3.3. TIPOS DE REDES DE ROTEAMENTO DE COMPRIMENTO DE ONDA

Atualmente, as implementações dos sistemas ópticos estruturam as redes em duas configurações distintas de roteamento de comprimento de onda, conforme a seguinte descrição:

3.3.1. ESTÁTICA

Não utiliza comutadores nos nós WXC's. Pode utilizar conversores de comprimento de onda estáticos mas não utiliza conversores dinâmicos, ou seja, o modelo de roteamento dos nós é fixo e não pode ser modificado.

Esse tipo de configuração do nó roteador é ilustrado na Figura 3.7.

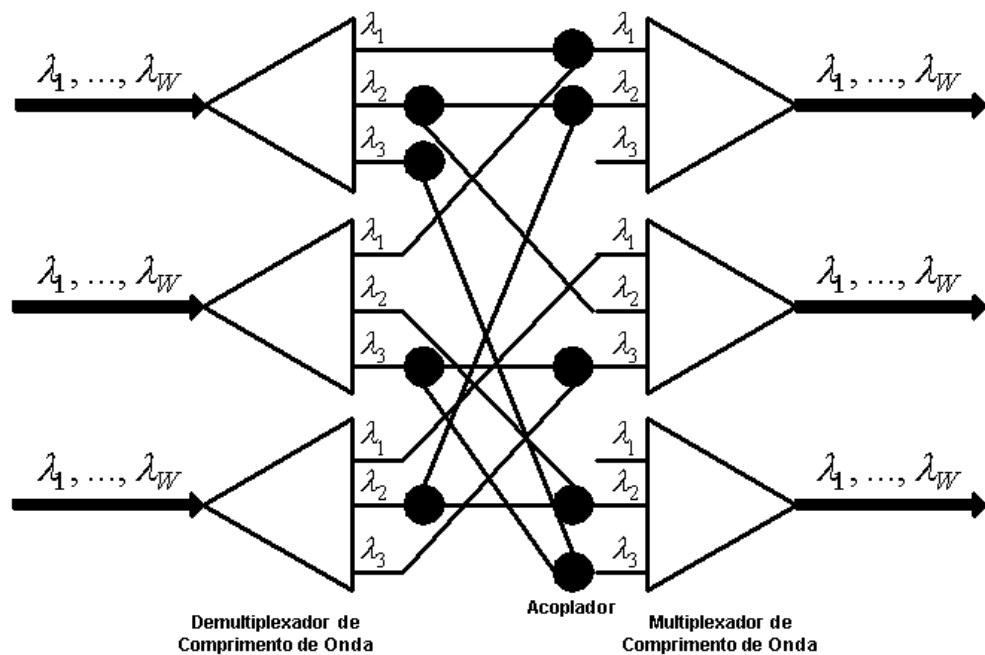


Figura 3.7 – Exemplo de um nó em uma rede estática

3.3.2. DINÂMICA

Utiliza comutadores nos nós WXC's e/ou conversores de comprimento de onda dinâmicos, habilitando a rede de modificar o modelo de roteamento dos nós. Esse tipo de configuração do nó roteador é ilustrado na Figura 3.4.

A principal diferença entre elas é que o conjunto dos caminhos ópticos, o qual pode ser estabelecido entre os usuários, é fixo no modelo estático, enquanto que pode ser modificado, por variar os estados dos comutadores ou conversores presentes nos nós WXC's, no modelo dinâmico.

A rede estática é mais econômica e visto que utiliza componentes passivos, torna-se mais confiável que a dinâmica. Um projeto de uma rede estática é apropriado se for fornecido um conjunto de pedidos de caminhos ópticos fixo que deve ser demandado. Entretanto, na maioria das redes, o conjunto dos caminhos ópticos pode não ser conhecido ou variar com o tempo. A questão é se redes estáticas podem manipular tais pedidos ou se comutadores serão necessários à rede.

As redes estáticas mais conhecidas exigem um grande número de comprimentos de onda para atender até mesmo modelos de tráfego com variabilidade limitada.

A incorporação de comutadores nessas redes resulta em uma redução no número de comprimentos de onda [1] [6] [8] [24].

3.4. COMPROMISSOS DE CUSTO DA CAMADA ÓPTICA

O tráfego pode ser diretamente roteado na camada óptica ao invés de ser realizado na camada superior. Isso permite economia de equipamentos nesta camada, enquanto acrescenta custos adicionais na camada óptica.

O ideal seria se todo o tráfego pudesse ser manipulado pela camada óptica. Entretanto, existe um problema devido à camada óptica não executar nenhum *grooming* em taxas de transmissão inferiores à capacidade de um comprimento de onda. Desta forma, a operação de adicionar ou retirar cadeias com taxas inferiores às utilizadas nos comprimentos de onda, fica restrita aos equipamentos de adição/remoção da camada superior. Isto enfatiza a importância do projeto de uma rede em concentrar o tráfego local em poucos comprimentos de onda.

Para determinar o custo de uma rede, os seguintes parâmetros precisam ser considerados:

- **Terminal de Linha (TL):** Desde que um caminho óptico é estabelecido entre dois TLs, em uma análise de custos, seria ideal utilizar o número mínimo possível de TLs Sonet/SDH para atender o tráfego dado. A otimização do número de TLs implica na redução do número de caminhos ópticos que devem ser configurados para atender o tráfego.

- **Comprimento de Onda:** Ao mesmo tempo, a otimização retorna à utilização do menor número possível de comprimentos de onda, isso porque um aumento deste número na rede, acarreta em um custo adicional de equipamentos na camada óptica.

- **Salto (Hop):** Esse parâmetro apresenta relação com o número máximo de saltos utilizados por um caminho óptico. O motivo da sua importância é que se torna mais complicado projetar o sistema de transmissão quando o número de saltos aumenta, acarretando também em um acréscimo nos custos da camada óptica [1] [6].

3.5. ROTEAMENTO E ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA

Alguns tipos de roteamento utilizados nas redes:

- **Transmissão:** A informação segue por todas as direções até atingir seu destino.
- **Roteamento Salto por Salto:** É utilizado o menor caminho do percurso até a informação atingir seu destino.
- **Roteamento Fonte:** É constantemente realizada uma consulta em uma lista de rotas disponíveis que eventualmente levem a informação ao seu destino.

Em um projeto de rede, pode-se utilizar uma topologia que minimize o número de comprimentos de onda exigidos para atender alguns modelos de tráfego. Mas quando a topologia já existe, além do compromisso entre os equipamentos da camada óptica e da camada superior, deve ser otimizado também um outro parâmetro, que é o de roteamento e atribuição de comprimento de onda (RACO). Uma ilustração do problema do roteamento de informações em uma rede é apresentada na Figura 3.8, que enfatiza a idéia de que diferentes algoritmos podem ser executados para estabelecer as rotas das conexões. Apesar disto, existe uma dificuldade em encontrar qual delas reflete a melhor opção em termos de custos, transporte de dados e atribuição de comprimentos de onda na rede.



Figura 3.8 – Ilustração do problema de roteamento em uma rede

Tal parâmetro é conceituado da seguinte maneira: Dada uma topologia de rede e um conjunto de pedidos ponto a ponto de caminhos ópticos, determinar uma rota e comprimentos de onda para todos os pedidos, utilizando o menor número possível de comprimentos de onda.

Dependendo da configuração dos enlaces e dos caminhos ópticos, reduz-se o número de comprimentos de onda da rede. Algumas vezes o roteamento já é fornecido, e neste caso, a única preocupação termina sendo com o problema de atribuição de comprimento de onda.

Deve-se levar em conta que o parâmetro de atribuição para uma rede deve obedecer às seguintes restrições:

- Em um dado enlace, o mesmo comprimento de onda não deve ser atribuído a dois caminhos ópticos.
- Se a conversão de comprimento de onda não for disponível, então deve-se atribuir a um caminho óptico o mesmo comprimento de onda em todos os enlaces da sua rota [1] [6] [24].

3.5.1. RELAÇÃO DE COLORAÇÃO DO GRÁFICO

O controle do parâmetro de atribuição de comprimento de onda, descrito anteriormente, tem uma relação muito próxima com o problema de coloração dos nós em um gráfico. Para entender melhor, é considerado uma representação gráfica da rede G , onde os vértices do gráfico representam os nós da rede, com um eixo não dirigido entre dois vértices correspondendo a um enlace de fibra óptica entre os nós correspondentes.

A rota para cada caminho óptico corresponde a um caminho em G , e então o conjunto de rotas que forem especificadas para os caminhos ópticos corresponde a um conjunto P de caminhos. Isto está representado na Figura 3.9.

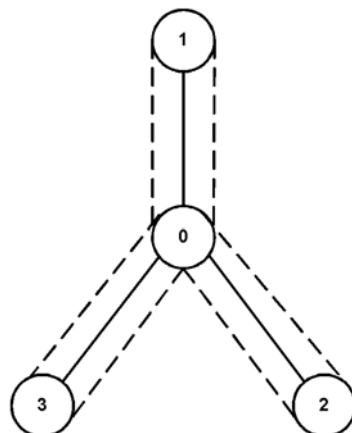


Figura 3.9 – Representação da rede G

É considerado um outro gráfico, o de caminhos de G denotado por $P(G)$, construído da seguinte forma: Cada caminho em P corresponde a um nó em $P(G)$, e dois nós em $P(G)$ são conectados por um eixo não dirigido se os caminhos correspondentes em P compartilham um eixo comum em G , conforme ilustrado na Figura 3.10.

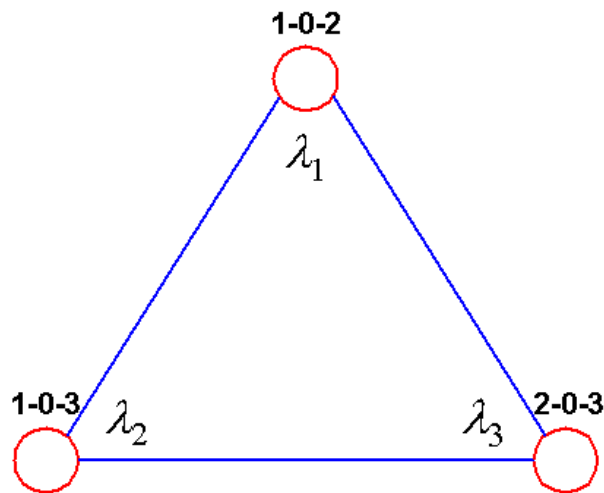


Figura 3.10 – Representação de $P(G)$

Resolver o problema de atribuição equivale a resolver o problema clássico de coloração do gráfico em $P(G)$, isto é, ter de atribuir uma cor a cada nó de $P(G)$, de modo que são atribuídas cores distintas a nós adjacentes e o número total de cores é minimizado. Essas cores correspondem aos comprimentos de onda utilizados nos caminhos de G . O número mínimo de cores necessário para colorir os nós de um gráfico é denominado de número cromático do gráfico (NCG). Portanto, o número mínimo de comprimentos de onda exigidos para resolver o problema de atribuição é igual ao número cromático de $P(G)$ [1] [7].

3.5.2. RACO OFFLINE - MODELO DE CARGA MÁXIMA

Adotando os pedidos dos caminhos ópticos para as demandas como sendo *Offline*, através da utilização do modelo de carga máxima, pode-se estimar o número de comprimentos de onda necessários em uma rede através do Teorema 3.1 [1].

- **Teorema 3.1**

Dado o roteamento de um conjunto de caminhos ópticos com carga L em uma rede G , com M eixos, com o número máximo de saltos em um caminho óptico sendo D , o número W de comprimentos de onda suficiente para satisfazer esse pedido é:

$$W \leq \min\left[(L-1)D+1, (2L-1)\sqrt{M}-L+2\right] \quad 3.1$$

Para efeitos de simulação, é considerada uma configuração com os seguintes parâmetros: $L=5$, $D=4$ e $M=24$, encontrando um número máximo de 17 comprimentos de onda que satisfaz os pedidos dos caminhos ópticos de acordo com a Eq(3.1). Essa simulação é realizada em função do número de comprimentos de onda (W) necessários para atender as demandas de acordo com uma variação da carga máxima da rede (L), sendo ilustrada graficamente na Figura 3.11.

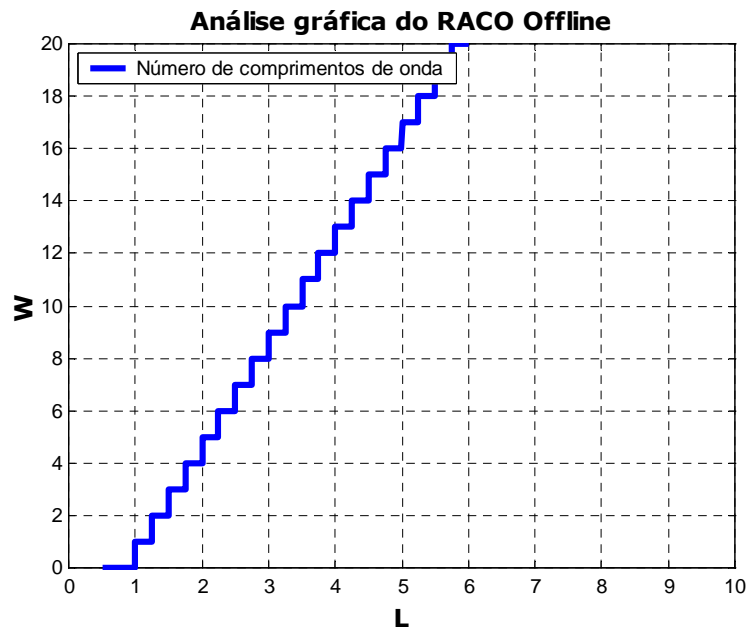


Figura 3.11 – Gráfico do número de comprimentos de onda, relativo ao RACO Offline, adotando o modelo de carga máxima

A configuração de rede em anel é talvez a topologia específica mais importante a considerar, sendo a mais simples e tem sido largamente explorada na maioria das atuais implantações das redes ópticas.

O anel, cortado em um nó, assemelha-se a uma rede em linha, cujo algoritmo de atribuição de comprimento de onda é descrito da seguinte forma:

- Numerar os comprimentos de onda de 1 a L , começando com o primeiro caminho óptico da esquerda e atribuindo a ele o primeiro comprimento de onda.
- Continuar com o próximo e atribuir a ele o menor número de comprimento de onda possível, até que todos os caminhos ópticos estejam com seu respectivo comprimento de onda.

Uma representação gráfica desse algoritmo é ilustrada na Figura 3.12.

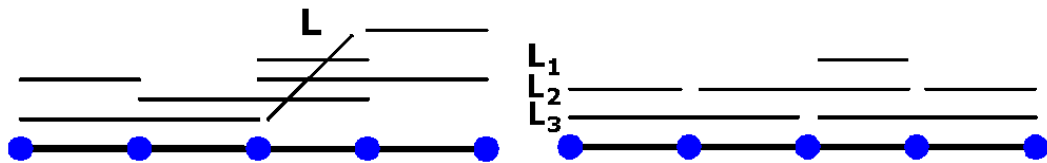


Figura 3.12 – Representação gráfica do algoritmo de atribuição de comprimento de onda para uma rede em linha

O método clássico, adotado para a atribuição de comprimento de onda (ACO) em um anel, apresenta os seguintes tópicos:

- Cortar o anel no nó que apresente o menor número de caminhos ópticos passando por ele, para transformá-lo em uma rede em linha.
- Atribuir comprimentos de onda, aos caminhos ópticos, de acordo com o algoritmo das redes em linha, e comprimentos de onda adicionais aos caminhos ópticos que atravessam o nó cortado.

Em um anel, existem duas rotas possíveis para cada caminho óptico. Dado um conjunto de pedidos de caminhos ópticos, existe um algoritmo que realiza o roteamento com a mínima carga possível L_{MIN} . A segunda alternativa, mais simples, é empregar o roteamento do caminho mais curto, o qual utiliza uma carga maior.

A experiência adquirida nas implementações das redes ópticas têm comprovado que, até mesmo na arquitetura em anéis, é complicado realizar o roteamento e atribuição de comprimento de onda. Entretanto, pode-se conseguir bons valores de quantos comprimentos de onda serão necessários, de acordo com o Teorema 3.2 [1].

• **Teorema 3.2**

Dado um conjunto de pedidos de caminhos ópticos e um roteamento em um anel com carga L , a ACO sem conversão, pode ser realizada com $2L - 1$ comprimentos de onda.

De acordo com a Figura 3.13, uma carga com valor igual a 5 fornece um conjunto de 9 comprimentos de onda de modo a satisfazer os pedidos dos caminhos ópticos da rede. Se a rede, com arquitetura em anel, possuir a capacidade de conversão de comprimento de onda, esse número pode ser minimizado.

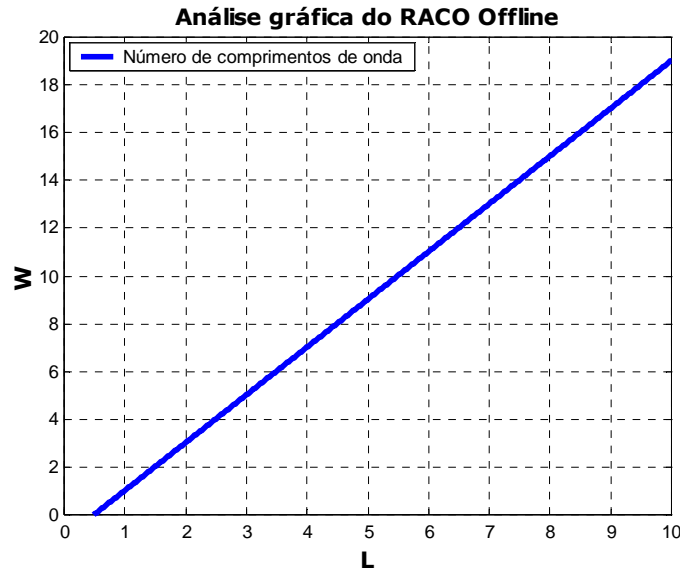


Figura 3.13 – Gráfico do número de comprimentos de onda, relativo ao RACO Offline, para uma rede em anel

Isto se deve ao fato de que com a presença de conversão completa em todos os nós, todos os pedidos dos caminhos ópticos, com carga $L \leq W$, podem ser atendidos. Entretanto, o mesmo resultado pode ser alcançado com uma menor utilização de conversão na rede. Tal comportamento é descrito pelo Teorema 3.3 [1].

- **Teorema 3.3**

Considerando uma rede em anel apresentando conversão completa em um determinado nó e nenhuma conversão nos outros nós, essa rede pode atender todos os pedidos dos caminhos ópticos com carga $L \leq W$.

A conversão limitada pode contribuir de forma significativa ao elevar o valor da carga que pode ser atendida em muitas configurações de redes. Isto pode ser ilustrado através do Teorema 3.4 [1].

- **Teorema 3.4**

Considera-se a rede em anel ilustrada na Figura 3.14, o qual apresenta conversão fixa em um nó, onde o comprimento de onda i é convertido para o comprimento de onda $(i+1) \pmod{W}$, e nenhuma conversão é realizada nos

outros nós. Essa rede pode atender todos os pedidos dos caminhos ópticos com carga $L \leq W - 1$.

Por ter conversão limitada ($d = 2$) em dois nós e nenhuma conversão nos outros, é possível melhorar esse resultado para $L \leq W$, fazendo tal rede tão eficiente quanto àquela que apresenta conversão completa em todos os nós. Resultados referentes ao número de comprimentos de onda necessários para atender as demandas utilizando diferentes tipos de conversão em redes distintas são ilustrados na Tabela 3.2 [1] [3] [24].

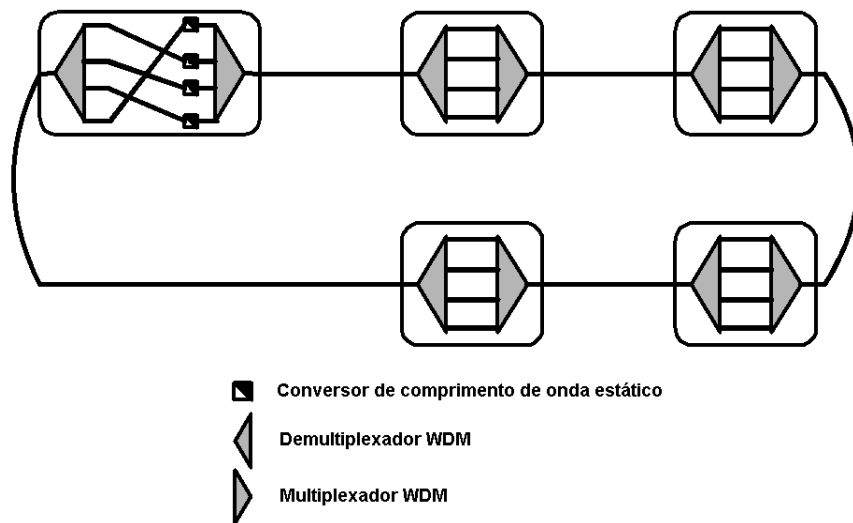


Figura 3.14 – Rede em anel com um nó apresentando conversão fixa

Tabela 3.2 – Resultados referentes a diferentes tipos de conversão

Rede	Tipo de Conversão			
	Nenhuma	Fixa	Completa	Limitada
Arbitrária	$\min[(L - 1)D + 1, (2L - 1)\sqrt{M} - L + 2]$	L	L	-
Anel	$2L - 1$	$L + 1$	L	L
Estrela	$\frac{3}{2}L$	L	L	-
Árvore	$\frac{3}{2}L$	-	L	L

3.5.3. RACO ONLINE EM ANÉIS - MODELO DE CARGA MÁXIMA

Admitindo que o roteamento dos caminhos ópticos já seja fornecido e que eles não são permanentes, torna-se mais complicado aproximar com algoritmos que maximizam a carga sem conversão completa. Uma propriedade importante que contribui nesta análise é ilustrada pelo Teorema 3.5 [1].

- **Teorema 3.5**

Seja $W(n, L)$ o número de comprimentos de onda exigidos para atender todos os pedidos dos caminhos ópticos Online, com carga L , em uma rede com n nós sem conversão. Se a rede é disposta em linha, o número de comprimentos de onda necessários é igual a $W(n, L) \leq L + W\left(\frac{n}{2}, L\right)$, para n par.

A topologia implementada para a rede está estruturada da seguinte forma:

- Divide-se a rede em linha no meio, de modo a conseguir duas redes distintas, cada uma com $\frac{n}{2}$ nós.

- Divide-se o conjunto dos pedidos dos caminhos ópticos em dois grupos: O grupo dos caminhos ópticos que fazem parte das subredes e o dos que atravessam as duas subredes.

Portanto, o primeiro grupo pode ser atendido por um conjunto máximo de $W\left(\frac{n}{2}, L\right)$ comprimentos de onda, sendo este conjunto utilizado em ambas subredes.

O segundo grupo pode ter uma carga máxima igual a L , sendo L o número de comprimentos de onda adicionais dedicados para servir esse grupo.

O Teorema 3.6 utiliza o mesmo raciocínio, assumindo as condições: $W(1, L) = 0$ e $W(2, L) = L$ [1].

- **Teorema 3.6**

Em uma rede em linha com n nós, todos os pedidos dos caminhos ópticos Online, com carga L , podem ser atendidos utilizando no máximo $L \lceil \log_2 n \rceil$ comprimentos de onda sem exigir conversão.

Esse algoritmo é completamente eficiente, desde que é possível aproximá-lo com os modelos de tráfego dos caminhos ópticos, de forma que qualquer algoritmo exigirá no mínimo $0.5L \log_2 n$ comprimentos de onda [1].

Com valores de $L = 5$ e $n = 25$, é obtido um conjunto de 25 comprimentos de onda necessários para atender o modelo descrito, o resultado dessa simulação foi obtido em função do número de comprimentos de onda necessários para atender os pedidos das demandas de acordo com uma variação no número de usuários da rede, sendo ilustrado graficamente na Figura 3.15.

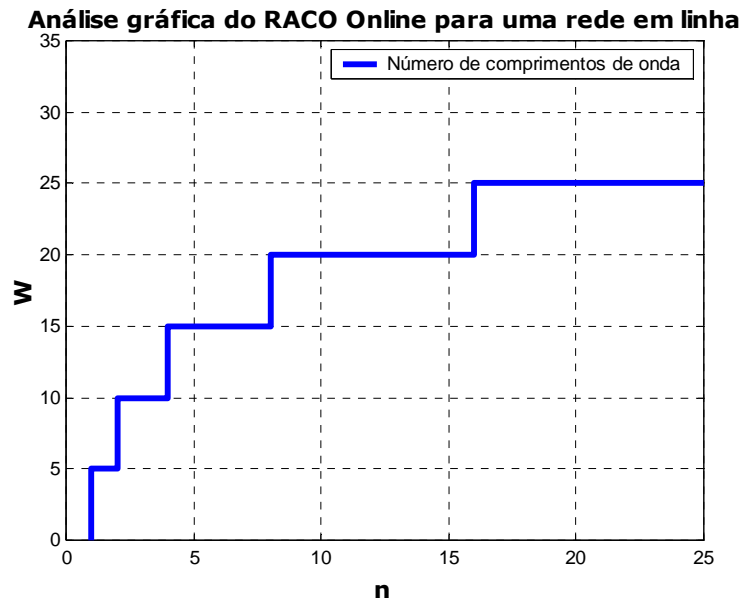


Figura 3.15 – Gráfico do número de comprimentos de onda, relativo ao RACO Online, para uma rede em linha

Uma proposição que contribui fortemente no uso deste tipo de roteamento nas redes em anel é fornecida pelo Teorema 3.7 e ilustrada na Figura 3.16 [1].

- **Teorema 3.7**

Em uma rede em anel com n nós, todos os pedidos dos caminhos ópticos Online, com carga L , podem ser atendidos utilizando no máximo $L \lceil \log_2 n \rceil + L$ comprimentos de onda sem exigir conversão.

Para a mesma configuração da Figura 3.15, é obtido um valor de 30 comprimentos de onda necessários para atender todos os pedidos dos caminhos ópticos da rede.

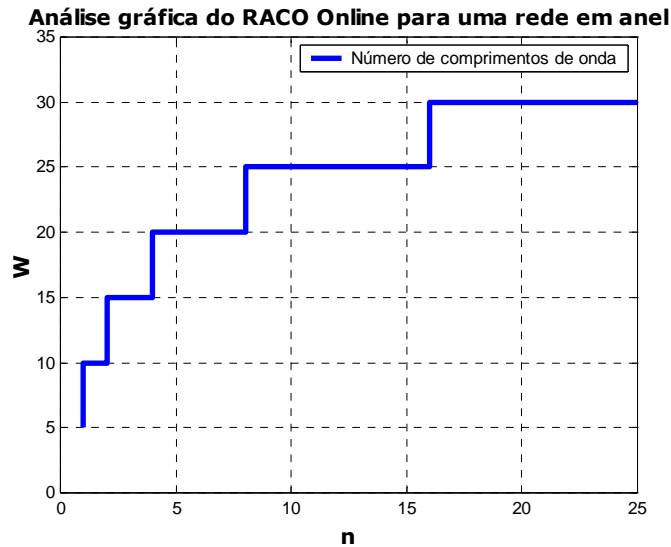


Figura 3.16 – Gráfico do número de comprimentos de onda, relativo ao RACO Online, para uma rede em anel

Quando existe a possibilidade de caminhos ópticos permanentes serem configurados, é possível obter atribuições de comprimento de onda com maior precisão, como fica assegurado pelo Teorema 3.8, ilustrado na Figura 3.17 e na Figura 3.18, sendo que essas figuras foram realizadas através de simulações de variação da carga máxima da rede (L) em função do número de comprimentos de onda (W) necessários para atender os pedidos das demandas [1].

- **Teorema 3.8**

Em uma rede em anel com n nós, todos os pedidos dos caminhos ópticos Online permanentes, com carga L , podem ser atendidos utilizando: (a) No máximo $2L$ comprimentos de onda sem conversão, e (b) No máximo $\max(0, L - d) + L$ comprimentos de onda de grau d , ($d \geq 2$), com conversão limitada.

Para esse modelo, aumentos significativos na carga do tráfego podem ser obtidos admitindo os conversores na rede. Para o caso *Offline*, a conversão limitada fornece quase o mesmo benefício que a completa. Para o caso *Online*, as cargas que podem ser atendidas são menores que o caso *Offline*. A advertência é que esse modelo representa os piores casos e a maioria dos tráfegos talvez possa ser atendida eficientemente sem exigir muitos comprimentos de onda ou conversores.

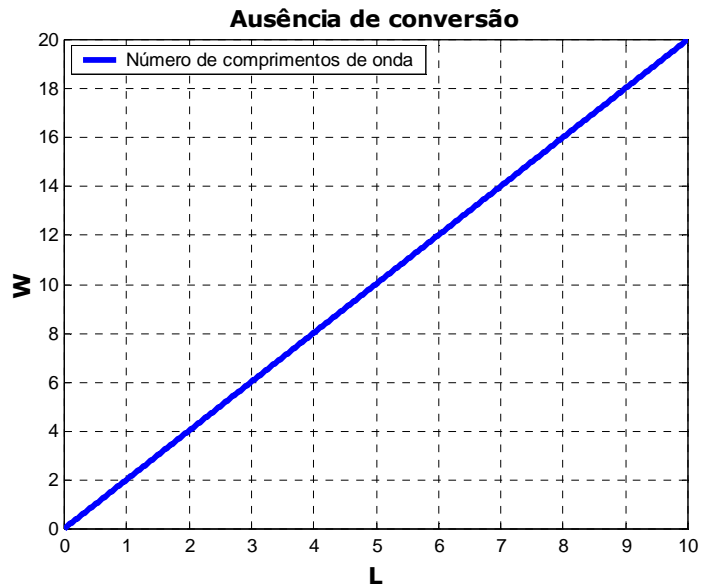


Figura 3.17 – (a) Gráfico do número de comprimentos de onda, relativo ao RACO Online, para uma rede em anel sem conversão

No caso (a) (Figura 3.17), o número de comprimentos de onda utilizados para suprir a necessidade dos caminhos ópticos permanentes, para o valor de carga igual a 5, é de 10 comprimentos de onda, enquanto que no caso (b) (Figura 3.18), admitindo-se grau de conversão limitada igual a 3, consegue-se um valor igual a 7 comprimentos de onda [1] [24].

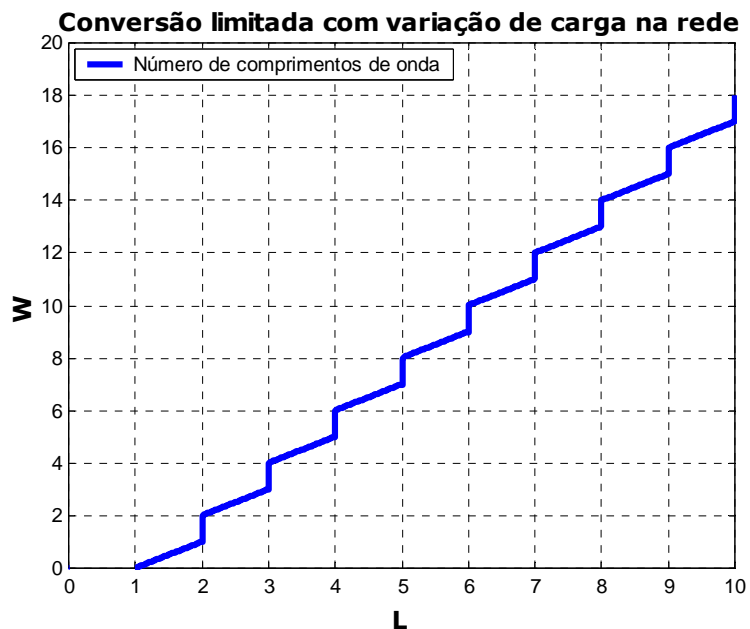


Figura 3.18 – (b) Gráfico do número de comprimentos de onda, relativo ao RACO Online, para uma rede em anel com conversão limitada

3.5.4. RACO *ONLINE* - MODELO ESTATÍSTICO

Os resultados discutidos até este ponto assumiram um modelo determinístico para os pedidos dos caminhos ópticos, em outras palavras, concorda-se com os piores casos e em muitos deles o interesse está nos médios casos. Isso corresponde à situação onde é suposto que os pedidos de estabelecimento e liberação dos caminhos ópticos seguem um modelo estatístico. Pode-se permitir que alguns pedidos dos caminhos ópticos sejam bloqueados, com o interesse de minimizar a probabilidade de bloqueio. Nesse caso, uma medida do tráfego do caminho óptico é a carga oferecida, cuja definição é a taxa de estabelecimento dos pedidos dos caminhos ópticos multiplicada pela sua duração média [1] [24].

Na prática, a probabilidade de bloqueio máxima é especificada, 1% por exemplo. Portanto, o interesse está em determinar a carga máxima que a rede pode atender. Uma medida mais conveniente é o fator R de reutilização de comprimento de onda (WRF – *Wavelength Reuse Factor*), o qual é definido como a carga oferecida por comprimento de onda da rede.

O WRF poderia depender da: (a) Topologia da rede, (b) distribuição do tráfego, (c) do algoritmo de RACO utilizado e (d) do número de comprimentos de onda disponíveis na rede.

Em princípio, se são dados (a)-(d), pode-se determinar o WRF. Na prática, a única maneira de estimá-lo, até mesmo para redes pequenas, é por simulação. É possível calcular seu valor máximo quando o número de comprimentos de onda for superior ao número de nós, considerando redes pequenas.

Caso o número de comprimentos de onda seja comparável ao número de nós, técnicas de simulação podem ser utilizadas para computar esse fator.

Quando é admitido o seguinte algoritmo RACO:

Numerar os comprimentos de onda disponíveis de 1 a W e para um pedido de caminho óptico, atribuir a ele o primeiro comprimento de onda disponível em um caminho fixo e de menor comprimento entre dois nós.

Resulta em um fator de reutilização um pouco maior utilizando conversão completa. O interessante é que esse parâmetro cresce quando o número de comprimentos de onda aumenta [1] [24].

Isso é devido ao fenômeno conhecido como *eficiência de troncalização*, ou seja, se ambas as capacidades de tráfego e do enlace variam proporcionalmente em um sistema comutado a circuito, a probabilidade de bloqueio pode ser reduzida [1] [33].

Para uma simulação onde o número de comprimentos de onda é fixo e o número de nós da rede é variável, pode-se constatar que: O WRF aumenta com n e a diferença entre ter e não ter conversão aumenta do mesmo modo.

O aumento do WRF é esperado, já que o percurso médio do caminho óptico (em termos do número de saltos) cresce com $\log n$, enquanto que o número de enlaces da rede cresce com n .

Portanto, espera-se que o fator de reutilização cresça com $\frac{n}{\log n}$. A diferença entre ter e não ter conversão pode ser explicada devido ao percurso médio do caminho (ou saltos) óptico na rede aumentar com n [1] [3].

3.5.5. ROTAS ALTERNATIVAS E ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA

Até o momento, enquanto era analisado o problema de RACO *Online* utilizando um modelo estatístico para o tráfego, foi assumido uma rota fixa entre cada par fonte-destino.

Serão apresentados alguns resultados de simulação para ilustrar os efeitos de utilizar rotas alternativas, e consideradas duas maneiras diferentes de atribuir comprimentos de onda, uma vez que a rota foi selecionada. Portanto, os seguintes algoritmos RACO serão considerados:

- **Aleatório – 1:** Para um pedido de caminho óptico entre dois nós, escolhe-se aleatoriamente um dos comprimentos de onda disponíveis para o caminho fixo, com menor distância, entre os dois nós.

- **Aleatório – 2:** Dois caminhos, com menor distância, são fixados entre todos os pares de nós. Para um pedido de caminho óptico entre dois nós, escolhe-se aleatoriamente um dos comprimentos de onda disponíveis no primeiro caminho. Caso nenhum comprimento de onda esteja disponível, escolhe-se aleatoriamente um dos comprimentos de onda para o segundo caminho.

- **Máximo Utilizado – 1:** Para um pedido de caminho óptico entre dois nós, dentre os comprimentos de onda disponíveis em um caminho fixo e com menor distância, escolhe-se um que é utilizado o maior número de vezes naquele ponto da rede.
- **Máximo Utilizado – 2:** Dois caminhos, com menor distância, são fixados entre todos os pares de nós. Para um pedido de caminho óptico entre dois nós, dentre os comprimentos de onda disponíveis no primeiro caminho, escolhe-se um que é utilizado o maior número de vezes naquele ponto da rede. Caso nenhum comprimento de onda esteja disponível, repete-se o processo de escolha para o segundo caminho.

A topologia considerada é uma rede de 20 nós e 39 enlaces. Admite-se que 32 comprimentos de onda estejam disponíveis em cada enlace e que o tráfego seja uniforme (o mesmo para todos os pares de nós). O fator de reutilização obtido por utilizar cada um dos quatro algoritmos, para uma probabilidade de bloqueio de 1%, é ilustrado na Tabela 3.3 [1] [24] [29].

Tabela 3.3 – Resultado da simulação dos algoritmos para o cálculo do WRF

Algoritmo RACO	Fator de Reutilização
Aleatório - 1	6.9
Aleatório - 2	7.8
Máximo – Utilizado - 1	7.5
Máximo – Utilizado - 2	8.3

Observa-se um acréscimo substancial no fator de reutilização quando um caminho alternativo é considerado.

Idealmente, seria melhor possuir mais rotas alternativas para rotas longas e menos para rotas curtas, o qual ajudaria a reduzir a probabilidade de bloqueio nas rotas longas, caso contrário, as rotas curtas tendem a apresentar menos bloqueio.

Um acréscimo no número de rotas equivale a considerar um aumento no tráfego de controle da rede. Isto acarreta em uma sobrecarga computacional adicional, o que não é expressivo em redes com um número moderado de nós, visto que os caminhos ópticos são estabelecidos e liberados lentamente.

Além da escolha das rotas, o algoritmo de ACO também representa um papel importante ao determinar o fator de reutilização. Visto que para o mesmo número de caminhos disponíveis, os algoritmos máximo utilizados apresentam uma vantagem distinta em relação aos aleatórios.

A razão intuitiva para esse fenômeno é que sua estratégia fornece uma maior probabilidade de encontrar o mesmo comprimento de onda livre em todos os enlaces ao longo de uma rota particular. Um inconveniente está relacionado à exigência do conhecimento dos comprimentos de onda em uso por todas as conexões, aumentando a carga do tráfego de controle da rede [1] [3].

3.6. VARIAÇÕES DE ARQUITETURA

Fundamentos teóricos foram apresentados como sendo aplicáveis às redes cujos nós são capazes de realizar o roteamento de sinais baseados em seus comprimentos de onda. Redes cujos nós roteiam sinais, mas não se baseiam nos seus comprimentos de onda, são chamadas de redes de ondas de luz lineares (LLN – *Linear Lightwave Network*).

A motivação principal para sua criação é devido ao fato de ser mais econômica e de fácil implementação, sua configuração é ilustrada na Figura 3.19.

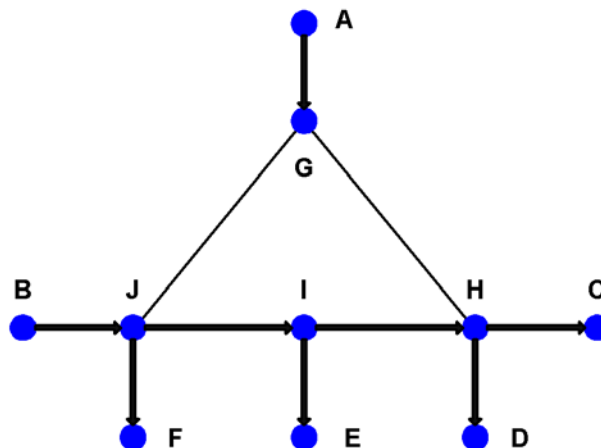


Figura 3.19 – Exemplo de uma rede LLN

Os nós nessas redes são chamados de combinadores e divisores lineares (LSC – *Linear Splitter and Combiner*), onde são compostos de divisores, combinadores e comutadores. A configuração dos comutadores é quem determina, aos sinais de entrada, as portas de saída específicas, conforme ilustrado na Figura 3.20.

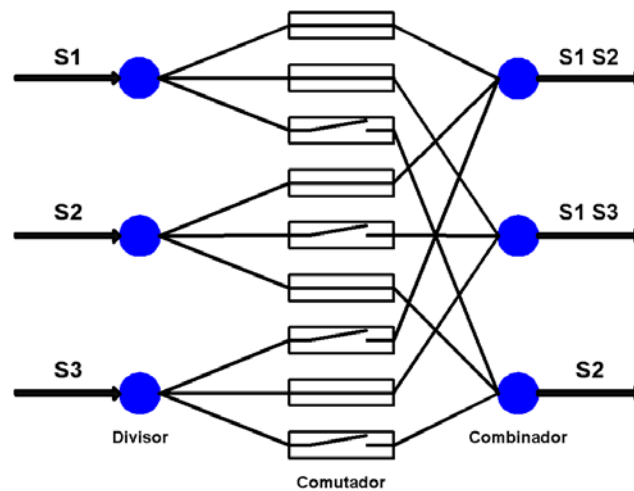


Figura 3.20 – Representação de um LSC

Nesse sentido, uma LLN pode ser similar a uma rede RCO, porém apresenta nós roteadores que não são seletivos a comprimentos de onda. As LLNs empregam uma quantidade limitada de capacidade de reutilização de comprimento de onda. Entretanto, elas também impõe um número de restrições adicionais na maneira como os caminhos ópticos podem ser roteados, onde tais condições devem ser prevenidas pelo algoritmo de roteamento, considerando tais eventos:

- Ao se criar novos caminhos ópticos, alguns comprimentos de onda podem se colidir no nó receptor, ou mesmo no percurso.
- Pode ocorrer ainda a criação de caminhos ópticos indesejáveis no percurso do sinal óptico.
- Sinais do mesmo nó transmissor podem percorrer caminhos diferentes e se interferirem no nó receptor.

O conceito de LLN tem sido estendido para aplicação em casos onde LSCs são parcialmente seletivos a comprimentos de onda, ou seja, eles podem comutar grupos de comprimentos de onda separadamente, chamados de bandas de onda, mas não podem distinguir entre os comprimentos de onda que fazem parte dessas bandas. Entretanto, esse conceito torna-se quase impraticável devido às perdas por divisão e combinação presentes nos nós além da complexidade adicionada ao roteamento.

As LLNs podem ainda representar um papel importante quando capacidades de multidistribuição devem ser incorporadas em uma rede RCO. Desse modo, um LSC pode ser utilizado, ao invés de um comutador, na multidistribuição de um comprimento de onda desejado [1] [3] [9].

CAPÍTULO IV

4. CONCEITOS DE PROTEÇÃO E DE REDES EM ANEL E EM MALHA

Em uma rede WDM roteada a comprimento de onda, um mecanismo de controle é necessário para estabelecer e liberar caminhos ópticos. Quando surge um pedido de conexão, esse mecanismo deve ser capaz de selecionar uma rota, atribuir um comprimento de onda à conexão, configurar os comutadores apropriados no decorrer da rota, e fornecer informações, tais como: *“Quais os caminhos ópticos existentes e quais comprimentos de onda estão, efetivamente, sendo utilizados em cada enlace de fibra”*. O gerenciamento é uma parte importante tanto a nível de configuração como para efeito de custos da rede [1] [6].

4.1. FUNÇÕES DO GERENCIAMENTO DE REDES

Classicamente, o gerenciamento de redes está subdividido nas seguintes funções:

- **Gerenciamento da Configuração:** Envolve o conjunto de funções associadas com o gerenciamento de mudanças ordenadas na rede. Por exemplo: Estabelecer e liberar conexões, visto que esses eventos não ocorram frequentemente ou que a rede seja complexa e apresente um número maior de usuários, rastrear e gerenciar a adição/remoção de equipamentos incluindo qualquer novo roteamento do tráfego que isso possa envolver.
- **Gerenciamento do Desempenho:** Envolve o monitoramento e gerenciamento dos vários parâmetros que medem o desempenho da rede.

É uma função essencial que habilita os operadores da rede a fornecer garantias de qualidade de serviço a seus clientes e assegurar que estes obedeçam às exigências impostas pelos operadores.

- **Gerenciamento de Falhas:** É responsável por detectar falhas, isolando o componente falho e recuperando o tráfego que possa ser interrompido.
- **Gerenciamento da Segurança:** Envolve proteção dos dados pertencentes aos usuários, evitando que os mesmos sejam grampeados ou corrompidos por entidades não autorizadas, também inclui funções administrativas tal como autenticação de usuários.
- **Gerenciamento de Contas:** É responsável pela fatura e por desenvolver históricos dos componentes da rede.

Para as redes ópticas, uma consideração adicional é o gerenciamento de operação com segurança, o qual é necessário para garantir que a irradiação óptica permaneça dentro de limites impostos, assegurando desta forma, proteção aos olhos durante o conserto de possíveis falhas do sistema.

A maioria das funções de gerenciamento da rede são implementadas de uma maneira centralizada através de uma central da rede (NMC – *Network Management Center*). Entretanto, esse método de implementação é lento, e pode consumir dezenas de milissegundos a segundos para estabelecer a comunicação entre o NMC e as diferentes partes da rede, isso devido aos grandes cabeçalhos dos caminhos geralmente envolvidos no processo. De qualquer modo, certas funções de gerenciamento, que exigem ações mais rápidas, podem ser descentralizadas, tais como: Resposta a possíveis falhas, estabelecimento e liberação de conexões. A descentralização de algumas destas funções ocorre quando a rede apresenta uma evolução em sua estrutura. Neste caso, torna-se complicado para um único gerenciador central administrar completamente a rede.

Os componentes individuais, que são gerenciados, recebem a denominação de elementos de rede (ER). Eles incluem amplificadores ópticos, roteadores e ADMs. Cada elemento é monitorado pelo seu gerenciador de elemento de rede (NEM – *Network Element Manager*).

O elemento em si possui um agente que se comunica com seu NEM, sendo implementado por *software* via microprocessador presente na estrutura do ER. Os NEMs se comunicam com um NMC através de uma rede de gerenciamento.

A comunicação entre o agente e seu gerenciador pode utilizar uma banda extra ou um dos comprimentos de onda da rede como um canal supervisorio. A informação a ser gerenciada para cada ER é representada sob a forma de base de informação de gerenciamento (MIB – *Management Information Base*).

A MIB contém um conjunto de variáveis, representando a informação a ser gerenciada, podendo incluir vários parâmetros operacionais a serem monitorados pelo agente e o gerenciador, assim como muitos parâmetros que são configurados pelo gerenciador para controlar o ER. A Figura 4.1 ilustra como as funções de gerenciamento da rede são implementadas em uma rede típica, onde os três blocos iniciais (Roteador WDM e amplificadores ópticos) são monitorados de uma forma centralizada e o último bloco que representa um roteador WDM é gerenciado de uma forma distribuída.

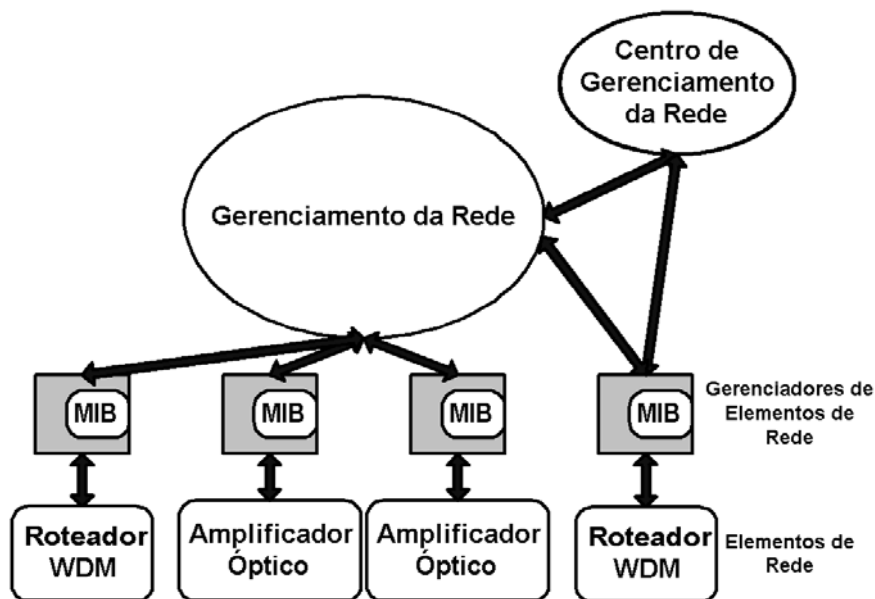


Figura 4.1 – Diagrama em blocos do gerenciamento de uma rede

A maioria dos sistemas de gerenciamento de redes utilizam um tipo de relacionamento *mestre-escravo* entre o gerenciador e os agentes, onde o gerenciador questiona o agente para obter as condições das variáveis na MIB. O agente pode também modificar os valores das variáveis na MIB, utilizando esse método para efetuar mudanças dentro dos ERs.

Além disso, é necessário para o agente, algumas vezes, iniciar uma troca de informações com seu gerenciador. Isso é essencial caso o agente detecte problemas no ER e queira alertar seu gerenciador.

Recuperação de falhas é uma exigência muito importante para as redes que utilizam altas taxas de transmissão, pois quanto mais elas transportam dados, mais a quantidade de interrupção, causada por uma perda relacionada à rede, torna-se expressiva.

Muitas técnicas existem para assegurar que as redes possam continuar a fornecer serviços confiáveis, mesmo na presença de falhas. Todas essas técnicas de proteção envolvem alguma capacidade de redundância, visando realizar um novo roteamento do tráfego na ocorrência de falhas na rede. Além disso, na maioria dos casos, elas são todas implementadas de uma maneira distribuída, ou seja, não exigem coordenação entre todos os nós da rede.

Essa característica final é necessária para assegurar recuperação rápida do serviço após uma falha. O termo *sobrevivência*, refere-se à habilidade da rede de continuar a fornecer serviço na presença de falhas.

Os mecanismos de proteção são projetados para proteger contra um único evento de falha. Isso admite que a rede é projetada de tal forma que a ocorrência de múltiplas falhas, simultâneas, seja um caso muito raro. Igualmente, pode-se assumir que é improvável ocorrer uma falha enquanto recupera-se o serviço devido a uma falha anterior. O tempo de recuperação depende do tipo/aplicação dos dados que estão sendo transportados [1] [3] [14].

4.2. CONCEITOS DE PROTEÇÃO

Dois tipos fundamentais de mecanismos de proteção são utilizados em enlaces ponto a ponto: Proteção [1+1] e [1:1], ou no caso mais geral, Proteção [1:N], conforme ilustrado na Figura 4.2.

Na Proteção [1+1], o tráfego é transmitido simultaneamente, da fonte para o destino, em duas fibras distintas, geralmente através de rotas diferentes. Denomina-se uma fibra de proteção e a outra de trabalho.

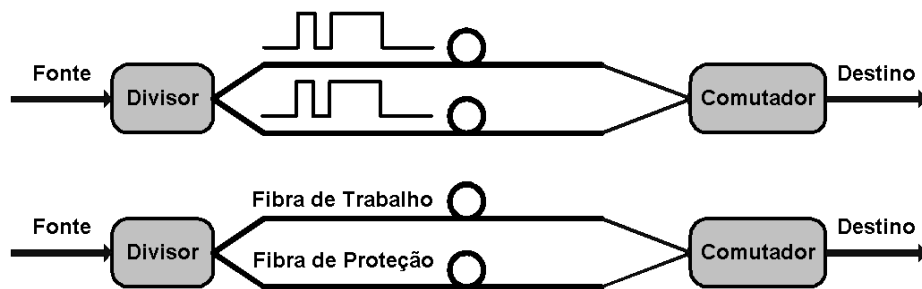


Figura 4.2 – Tipos de proteção em enlaces ponto a ponto

O mecanismo de recepção do nó destino seleciona uma das fibras para receber a informação. Caso ocorra um corte em alguma delas, ele simplesmente comuta para a outra e continua a receber os dados.

Essa forma de proteção é caracterizada por uma resposta rápida do sistema, não exigindo protocolo de sinalização entre o nó fonte e o nó destino.

Na Proteção [1:1] o tráfego é transmitido somente para a fibra de trabalho. Caso ocorra um corte na mesma, a fonte e o destino são comutados para a fibra de proteção. Em um sistema unidirecional, o corte na fibra será detectado somente pelo destino e não pela fonte. Portanto, este deve comunicar à fonte, de modo a ser comutada para a fibra de proteção, exigindo uma sinalização chamada de protocolo de comutação de proteção automática (APS – *Automatic Protection Switching*). Em sistemas bidirecionais, o corte na fibra será detectado por ambos, não exigindo o APS.

Em sistemas unidirecionais, o esquema de Proteção [1:1] não oferece resposta do sistema tão rápida na recuperação do tráfego quanto o [1+1], por causa da adição de comunicação envolvida. Entretanto, o [1:1] oferece mais vantagens que o [1+1], tais como:

- Sobre operação normal, no qual a fibra de proteção não se encontra em uso, esta pode ser utilizada para transmitir tráfego de baixa prioridade, o qual em caso de falhas na fibra de trabalho, deve ser descartado. Essa vantagem deixa de existir caso nenhum transmissor ou receptor extra esteja disponível para manipular esse tráfego de baixa prioridade.
- É possível compartilhar uma única fibra de proteção com muitas fibras de trabalho.

No esquema de Proteção $[1:N]$, N fibras de trabalho compartilham uma única fibra de proteção. Este arranjo pode manipular a falha de qualquer fibra de trabalho. No caso de múltiplas falhas, o APS deve assegurar que o tráfego de somente uma das fibras seja comutado para a fibra de proteção. Esse esquema de proteção é ilustrado na Figura 4.3.

Quando a fibra de trabalho original é reconfigurada, no esquema de Proteção $[1+1]$, ela retorna como fibra de proteção, caracterizando um processo denominado de não reversível.

No esquema $[1:N]$ é desejável que o tráfego seja comutado de volta para a fibra original, fazendo com que o tráfego de baixa prioridade possa continuar a utilizar a fibra de proteção.

Isto caracteriza um processo denominado de reversível, podendo ser realizado automaticamente ou por intervenção manual.

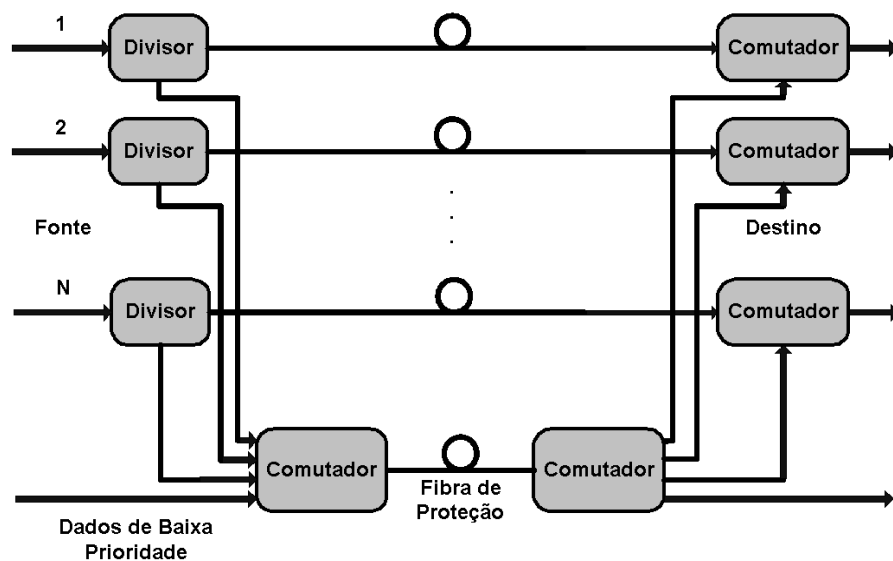


Figura 4.3 – Proteção $[1:N]$

Em uma rede, cada enlace transporta tráfego de diferentes fontes orientado para diferentes destinos. Existem duas maneiras de proteger esse tráfego:

- **Comutação ou Proteção do Caminho:** A recuperação do tráfego é manipulada pela fonte e pelo destino de cada cadeia de tráfego individual. O tráfego é roteado novamente, no caso de alguma falha, ao longo da rota entre os dois nós. Este tipo de comutação é ilustrado na Figura 4.4.

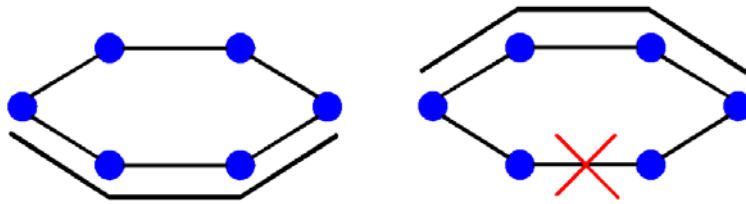


Figura 4.4 – Proteção do caminho

- **Comutação de Linha:** A recuperação do tráfego é manipulada pelos nós nas terminações de um enlace falho, ao invés da fonte e do destino. Pode ser implementado de duas maneiras:

(a) **Proteção de Duração:** Se a fibra é cortada entre dois nós, o tráfego é comutado para a fibra de proteção entre eles, conforme ilustrado na Figura 4.5.

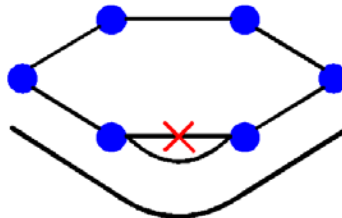


Figura 4.5 – Proteção de duração

(b) **Proteção de Linha:** O tráfego é comutado para outra rota, através da rede, entre os mesmos dois nós, conforme ilustrado na Figura 4.6.

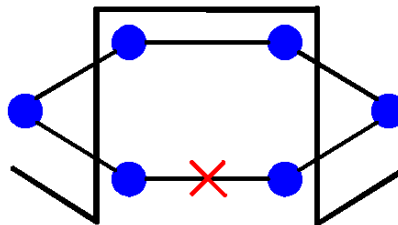


Figura 4.6 – Proteção de linha

Assim como em enlaces ponto a ponto, a proteção do caminho pode ser implementada em um arranjo $[1+1]$ ou $[1:N]$. O $[1+1]$ é ineficiente porque exige duas vezes mais largura de faixa para cada conexão. No arranjo $[1:N]$, N caminhos podem compartilhar um único caminho reserva para proteção, sendo desta forma, mais eficiente [1] [3] [14].

4.3. REDES EM ANEL

A rede óptica estruturada na forma de anel é uma topologia que fornece dois caminhos distintos, para transporte do tráfego, entre quaisquer pares de nós.

Isto faz com que não exista nenhum nó ou enlace em comum, exceto os nós fonte e destino, permitindo assim, que a rede se recupere de falhas. Os tipos de arquiteturas em anel diferem em dois aspectos: A direção do tráfego e os mecanismos de proteção utilizados.

As três arquiteturas em anel mais populares são:

- Anéis unidirecionais de duas fibras comutados a caminho (UPSR – *Unidirectional Path-Switched Ring*);
- Anéis bidirecionais de quatro fibras comutados em linha (BLSR/4 – *Bidirectional Line-Switched Ring*) e
- Anéis bidirecionais de duas fibras comutados em linha (BLSR/2).

4.3.1. UPSR

Uma fibra é utilizada para trabalho e a outra com o propósito de proteção. O tráfego é transmitido em uma direção na fibra de trabalho e na direção oposta na de proteção. O destino continuamente monitora as duas fibras e seleciona o melhor sinal entre elas. Sua respectiva configuração é ilustrada na Figura 4.7.

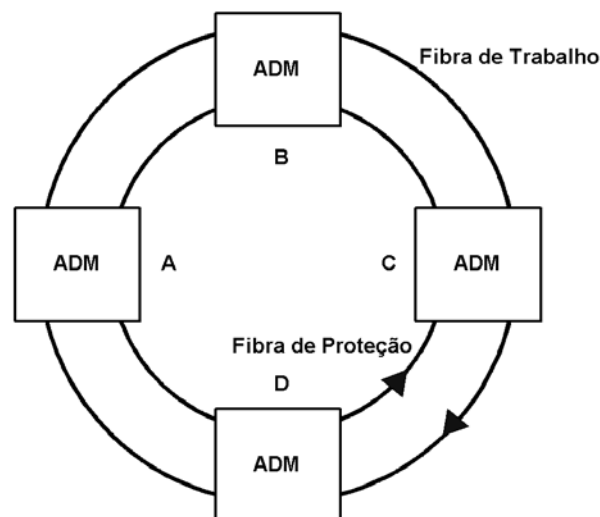


Figura 4.7 – Rede em anel configurada na forma UPSR

Em caso de falha na fibra de trabalho ou em um nó intermediário o destino comuta para a fibra de proteção, caracterizando assim um esquema de Proteção [1+1], onde a capacidade exigida para propostas de proteção é igual à de trabalho.

O principal inconveniente da arquitetura UPSR é que ela não reutiliza espacialmente a capacidade da fibra, uma vez que cada conexão utiliza sua capacidade em todo enlace do anel. São topologias de uso popular em redes de acesso e de intercâmbio local de baixas taxas de transmissão, em particular, onde o tráfego é primariamente ponto a multiponto, ou seja, de cada nó para um nó distribuidor (*hub*) e vice-versa. São fáceis de ser implementadas devido à simplicidade do seu esquema, exigindo ação somente no receptor, sem necessidade de protocolos de sinalização complexos [1] [2] [3] [4].

4.3.2. BLSR

Comparados com o UPSR, eles empregam capacidade de reutilização espacial e incorporam mecanismos de proteção adicionais. A Figura 4.8 ilustra um BLSR de quatro fibras, onde duas são utilizadas para trabalho, e as outras para proteção.

Diferentemente do UPSR, o tráfego nas fibras de trabalho pode ser transportado em ambas direções ao longo do anel. Em geral, o tráfego pertencendo a ambas direções de uma conexão é roteado pelo menor caminho entre dois nós no anel.

Essa configuração de rede pode apresentar até 16 nós, sendo esse número limitado pelo campo de endereçamento de quatro bits utilizado pelo identificador do nó. O comprimento máximo do anel é restrito a 1.200 km, devido às exigências do tempo de recuperação no caso de ocorrência de uma falha.

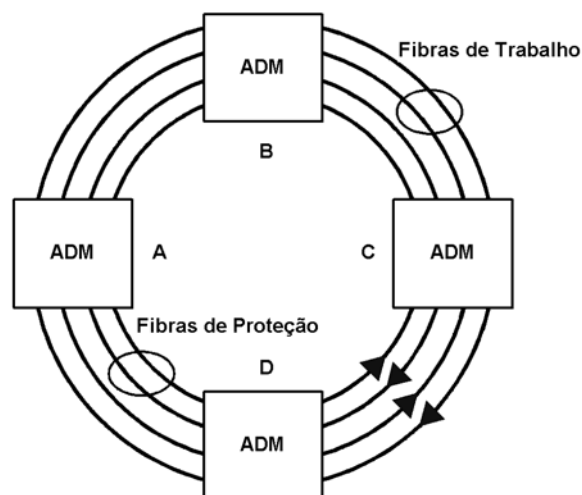


Figura 4.8 – Rede em anel configurada na forma BLSR/4

Utiliza dois tipos de mecanismos de proteção:

- Proteção de duração, onde a ocorrência de falha, em uma fibra de trabalho, faz com que o tráfego seja roteado para a fibra de proteção entre os dois nós do mesmo enlace, conforme ilustrado na Figura 4.9.

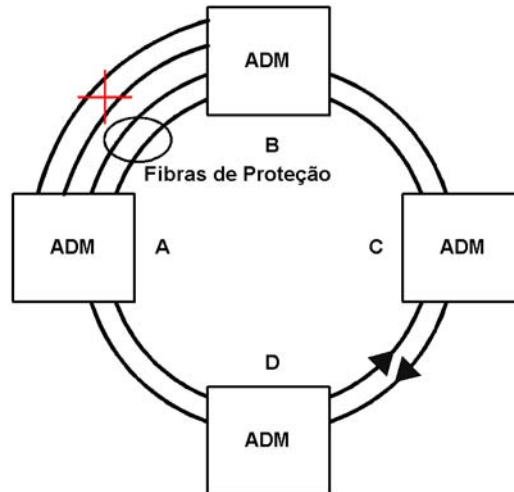


Figura 4.9 – Proteção de duração no BLSR/4

Se as fibras de proteção são roteadas separadamente das fibras de trabalho, é improvável que ocorra um corte simultâneo entre elas. Neste caso, a proteção de duração também pode ser utilizada para manipular um corte na fibra de trabalho.

- De qualquer modo, caso ocorra um corte simultâneo entre elas, o serviço é recuperado pela proteção de linha, onde este tipo de proteção também trabalha no caso de falha de um nó intermediário, conforme ilustrado na Figura 4.10.

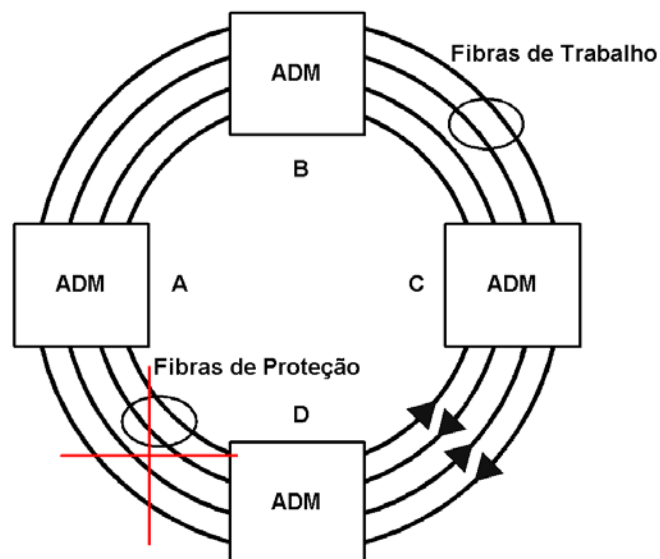


Figura 4.10 – Proteção de linha no BLSR/4

O BLSR/2 é similar ao BLSR/4, com exceção das fibras de proteção figurar entre as de trabalho, conforme ilustrado na Figura 4.11. Ambas as fibras são utilizadas para transportar o tráfego de trabalho, porém reserva-se metade da capacidade de cada uma para propostas de proteção. Diferentemente do BLSR/4, a proteção de duração não é possível no BLSR/2, ao invés disso, o mesmo utiliza a proteção de linha. No caso de falha no enlace, o tráfego é roteado novamente ao longo de outra parte do anel, utilizando a capacidade de proteção disponível nas duas fibras de trabalho.

Uma vantagem da proteção de linha no BLSR/2 é que a largura de faixa de proteção possibilita o transporte do tráfego de baixa prioridade durante a operação normal. Esse tráfego é descartado caso a largura de faixa seja necessária para recuperação do serviço.

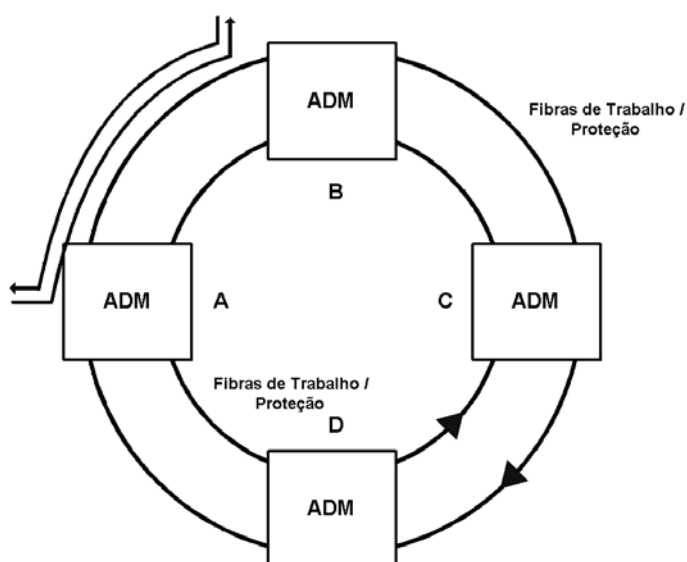


Figura 4.11 – Rede em anel configurada na forma BLSR/2

As arquiteturas BLSRs são mais eficientes que as UPSRs no atendimento aos modelos de tráfego distribuídos. Sua eficiência vem do fato de que a capacidade de proteção do anel é compartilhada entre todas as conexões, ao contrário da arquitetura UPSR, que exige capacidade de proteção dedicada para cada conexão. Por essa razão, as BLSRs são bastante utilizadas em redes de intercâmbio local e de longas distâncias. Embora o BLSR/4 possa manipular alguns tipos de falhas a mais, o gerenciamento do anel é mais complicado do que o BLSR/2, visto que múltiplos mecanismos de proteção têm de ser coordenados [1] [2] [3] [4].

4.3.3. CONFIGURAÇÃO REDUNDANTE

Uma limitação das arquiteturas configuradas em anel está relacionada ao fato que, no caso de uma falha em um nó, todo o tráfego fornecido ou destinado a ele é extraviado. Isso pode ser um problema crucial, caso o nó em questão, seja o nó *hub* principal, no qual está sendo demandada uma grande quantidade de tráfego.

Uma maneira de resolver esse problema é utilizar a configuração redundante (*dual homing*), que necessita de dois nós *hub*, ao invés de somente um normalmente empregado no UPSR. As conexões são configuradas entre cada nó e os dois nós *hub*, caso algum deles falhe, o outro assume seu lugar e o usuário final não observa nenhuma interrupção do tráfego, conforme ilustrado na Figura 4.12.

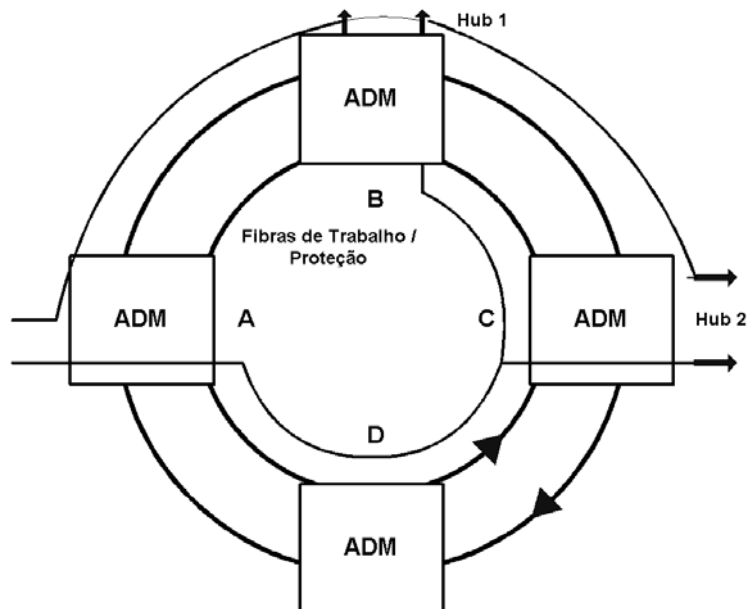


Figura 4.12 – Configuração Dual Homing

Ao invés de utilizar a configuração de duas conexões, devido ao esquema de Proteção [1+1], a arquitetura utiliza a característica de multidistribuição presente nos ADMs, onde cada um deles retira o tráfego do nó, e deixa passá-lo para o outro nó *hub*, considerando ambas as direções do tráfego [1] [3].

4.4. REDES EM MALHA

Recuperar o serviço das redes em malha é um pouco mais complicado do que em enlaces ponto a ponto ou redes em anel.

Uma técnica de proteção simples é estabelecer caminhos de dois eixos ou de nós diferentes para cada conexão, e manipular falhas utilizando Proteção [1+1].

Assim como na configuração em anel, essa aproximação é ineficiente, visto que a largura de faixa necessária para proteção não é compartilhada entre as múltiplas conexões. Uma melhor aproximação é utilizar proteção de linha, o qual habilita compartilhamento dos recursos de proteção entre as conexões.

Se um enlace falha, todas as conexões naquele enlace são roteadas novamente ao longo de outro caminho entre os nós nas terminações do enlace falho. O problema é realizá-lo sem exigir coordenação entre os nós ao longo desse caminho.

As falhas nos nós são geralmente menos prováveis porque, em muitos casos, configurações redundantes são utilizadas.

Entretanto, os nós podem falhar devido a alguns eventos inesperados. Mecanismos de recuperação, que devem manipular ambas as falhas dos nós e dos enlaces, são bem mais complexos.

A falha em um nó é vista, por todos os seus nós adjacentes, como falhas dos enlaces que os conectam ao nó falho. Se cada um dos nós adjacentes executar a recuperação admitindo ser uma simples falha do enlace, podem ocorrer conseqüências indesejáveis, causando erros na conexão, conforme ilustrado na Figura 4.13.

A única maneira de prevenir tais ocorrências, é assegurando que os nós, que executam a recuperação, determinem o tipo de falha antes de invocar seus mecanismos de recuperação, exigindo assim troca de mensagens entre os nós da rede. Esse procedimento pode evitar erros de conexão, uma vez que não é realizada nenhuma tentativa de recuperar o tráfego que origina ou termina em um nó falho. Isto demanda um maior tempo de recuperação devido à coordenação exigida entre os nós para determinar o mecanismo apropriado a ser utilizado [1] [3].

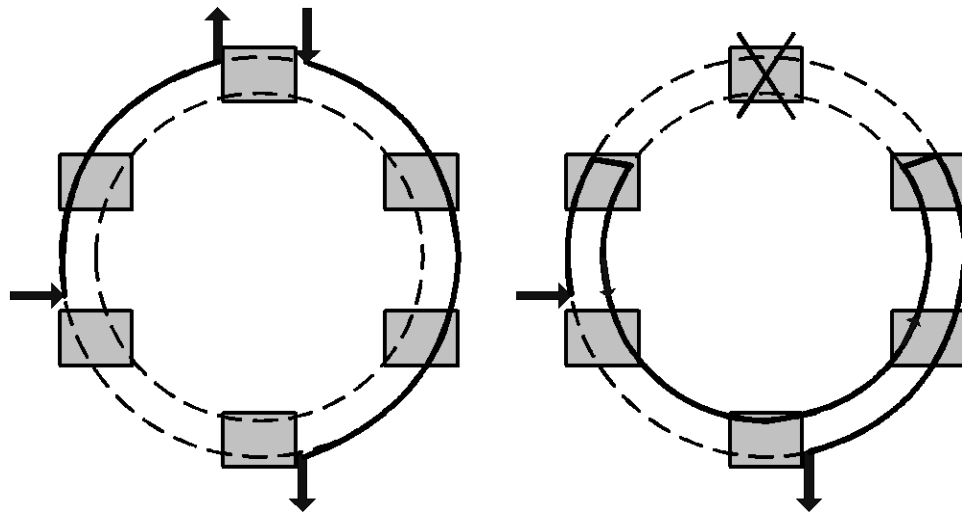


Figura 4.13 – Possibilidade de falha em um nó

4.5. INTERAÇÃO ENTRE CAMADAS

Uma rede é composta de várias camadas, sendo que cada uma delas possui seu próprio mecanismo de proteção independente das outras. O processo tecnológico, utilizado no desenvolvimento desses mecanismos de proteção, não leva em consideração como estes operam com os mecanismos das outras camadas.

A topologia de uma rede óptica pressupõe a interação de uma determinada camada da rede com uma grande variedade de outras camadas (*Interworking between layers*). A existência dos mecanismos de proteção em diferentes camadas pode fornecer duas vantagens distintas:

- Desconhece-se, *a priori*, quais camadas estão próximas de uma dada camada da rede. Em alguns casos, outras camadas podem não ter mecanismos de proteção e podem, então, confiar nessa camada particular para fornecer a proteção.
- Diferentes tipos de falhas são melhor manipulados por camadas distintas, e recursos de proteção podem ser utilizados mais eficientemente por ter certos tipos de falhas manipulados pelas camadas inferiores.

Os mecanismos de proteção, presentes em camadas distintas, podem fornecer algumas desvantagens. De acordo com as normas de padronização, os mecanismos de proteção em camadas diferentes devem operar independentemente.

De fato, uma única falha pode acionar múltiplos mecanismos de proteção na tentativa de recuperar o serviço simultaneamente, o qual resultaria em um grande número de alarmes desnecessários, sobrecarregando o centro de gerenciamento. Desse modo, é desejável ter algum tipo de coordenação entre os mecanismos de proteção das diferentes camadas.

Em alguns casos, pode ser possível adicionar uma prioridade ao mecanismo onde uma camada tenta recuperar o serviço primeiro, e somente após um intervalo de tempo, tenta uma segunda camada. Uma maneira automática de realizar isso é de modo que uma camada recupera o serviço rapidamente fazendo com que a outra camada nem perceba a ocorrência de uma falha [1] [3].

CAPÍTULO V

5. ANÁLISE DO ROTEAMENTO NAS REDES ÓPTICAS

5.1. SIMULAÇÃO DE ROTEAMENTO EM UMA REDE ÓPTICA, COM NÓS APRESENTANDO, OU NÃO, CONVERSÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA

Este modelo é baseado em uma rede hipotética com seis nós e na matriz de tráfego referente à Tabela 5.1, admitida segundo simulações realizadas com o *VPItransportMaker*TM;

Tabela 5.1 – Matriz de tráfego da rede

Fonte/Destino	Quantidade STM-16
N1-N2	5
N1-N3	7
N1-N4	6
N1-N5	68
N1-N6	4
N2-N3	3
N2-N4	8
N2-N5	11
N2-N6	12
N3-N4	7
N3-N5	8
N3-N6	13
N5-N4	9
N6-N4	11
N6-N5	14

O *software*, *VPItransportMaker*TM, apresenta dois tipos de janelas de camadas: A camada do cliente, onde se localizam as demandas do tráfego do usuário ou cliente; e a camada do servidor, onde estão as camadas dos dutos, fibras e as mais altas da hierarquia de transporte, no qual é realizado o roteamento das demandas presentes na camada do cliente [2] [4] [17].

De posse dessas informações, a Figura 5.1 ilustra as configurações para a camada da fibra, ou camada do servidor, e a do cliente. De modo que a camada da fibra representa a camada física da rede e a do cliente indica uma representação gráfica em termos de nós da Tabela 5.1.

Com base nessas informações, a seguinte simulação será realizada:

Simulação de roteamento em uma rede apresentando nós sem conversão de comprimento de onda, e após uma análise do resultado, será aplicada conversão limitada em alguns nós de acordo com a respectiva análise.

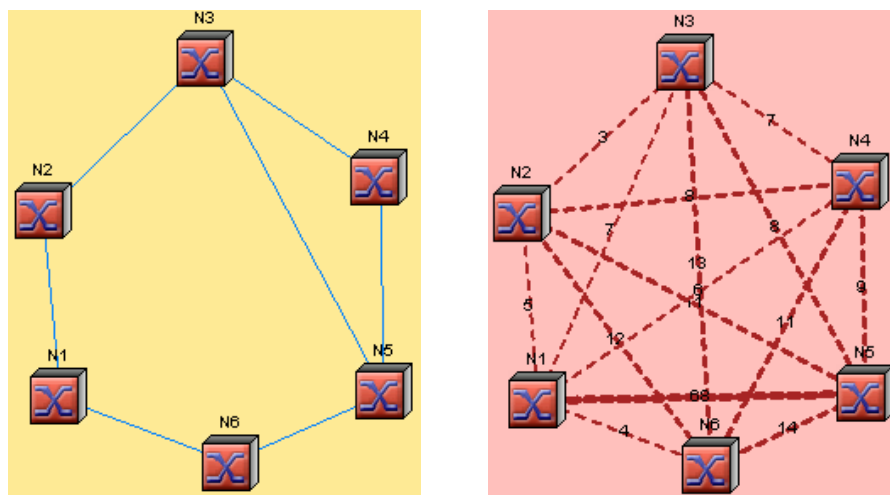


Figura 5.1 – Camada da fibra e do cliente

A plataforma de simulação utilizada estabelece as diretrizes para obter um roteamento de comprimento de onda de acordo com a execução dos seguintes passos:

- Realizar o roteamento das demandas do tráfego na camada do servidor,
- Multiplexar as demandas em uma nova camada, a camada de seção de multiplexação óptica (OMS – *Optical Multiplex Section*), de modo a criar a topologia do sistema WDM.
- Desconsiderar o primeiro roteamento e efetuar o roteamento de comprimento de onda na camada OMS, considerando as demandas iniciais do tráfego.

Baseando-se na Tabela 5.1, o roteamento na camada do servidor é realizado a partir das opções ilustradas na Figura 5.2.

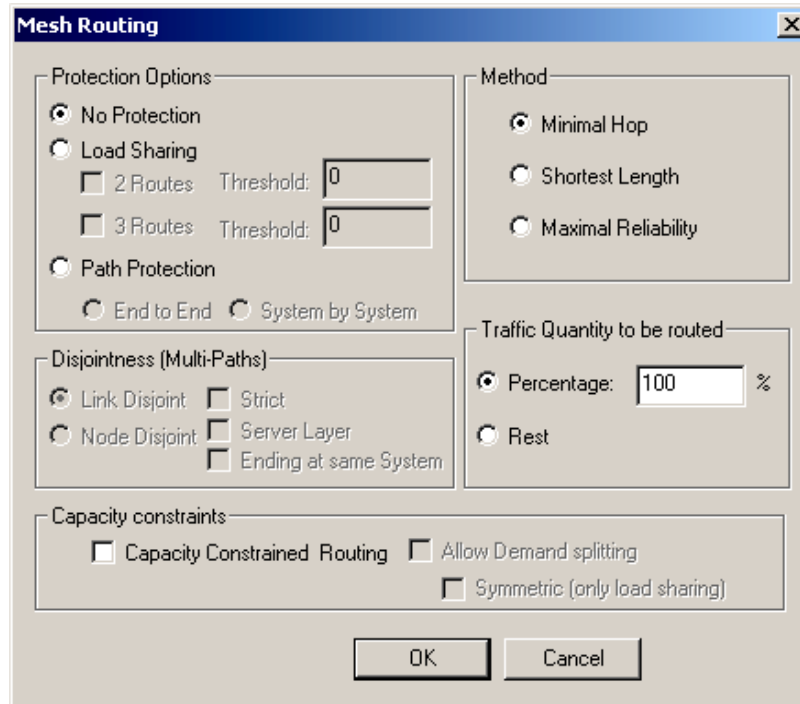


Figura 5.2 – Opções de roteamento

Ou seja, um roteamento considerando o menor número de saltos, sem nenhum mecanismo de proteção e nenhum outro que considere restrição da capacidade do enlace ou um novo roteamento.

Multiplexando as demandas de tráfego iniciais de modo a estabelecer um sistema WDM, tem-se a topologia na camada OMS conforme ilustrado na Figura 5.3.

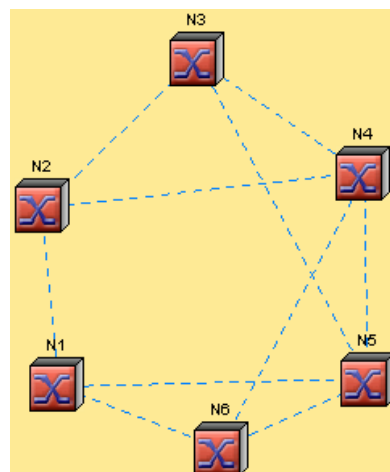


Figura 5.3 – Topologia na camada OMS

Efetua-se o roteamento dos comprimentos de onda na camada OMS, considerando as demandas de tráfego iniciais, de acordo com a configuração ilustrada na Figura 5.4;

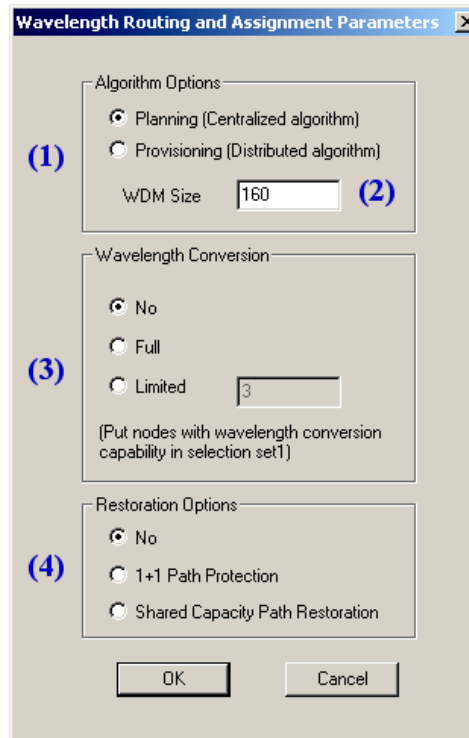


Figura 5.4 – Configuração do roteamento sem conversão

Onde:

- (1) Fornece a opção de algoritmo centralizado, admitindo conhecimento total dos nós e enlaces da rede, visando descobrir o tamanho ótimo do sistema WDM, o qual é o número de comprimentos de onda exigidos para transportar todas as demandas especificadas;
- (2) Indica a opção do tamanho WDM, sendo responsável por fazer uma estimativa do número de comprimentos de onda (CO) exigidos no projeto da rede, onde o critério de análise final é responsável por fornecer o número adequado ao projeto;
- (3) Ilustra os tipos de conversão exigidos nos nós;
- (4) Fornece as opções de recuperação do tráfego, o qual pode ser [1+1] ou com recuperação do caminho com capacidade compartilhada [2] [4].

Após executar os passos de simulação descritos, obtem-se o resultado apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultado do roteamento sem conversão

Nº do maior CO utilizado na rede:		37
Índice de utilização da rede:		317
Índice de bloqueio de CO:		344
Enlace	Nº do maior CO utilizado	Nº de COs utilizados
N1_N2	37	36
N1_N5	37	37
N2_N3	35	26
N2_N4	31	25
N3_N4	30	21
N3_N5	35	35
N4_N5	33	33
N4_N6	32	32
N5_N6	37	37
N6_N1	37	35

A partir desse resultado, devem-se efetuar algumas providências em prol de otimizar a utilização dos comprimentos de onda nos enlaces da rede, tais como:

- Aumentar o índice de utilização e diminuir o de bloqueio da rede. Isso porque o primeiro fornece uma medida da utilização total dos enlaces da rede, enquanto que o outro diz respeito à indicação da probabilidade de bloqueio do pedido de caminho óptico devido ao fato da indisponibilidade de comprimentos de onda.
- Inicialmente foi estipulado o valor de 160 para o tamanho do sistema WDM da rede. Com o resultado, foi visto que o número máximo de comprimentos de onda utilizados possui valor igual a 37. Com isso, pode-se reduzir o número inicial de comprimentos de onda presentes na rede.
- Analisando-se os enlaces, conclui-se que N2_N3, N2_N4 e N3_N4 apresentam um número de comprimentos de onda utilizados inferior ao número do maior comprimento de onda utilizado nos seus enlaces. A solução é empregar conversão nesses nós (N2, N3 e N4) de modo a reduzir tanto o índice de bloqueio, como também essa diferença entre o maior e o número de comprimentos de onda utilizados nos enlaces, fazendo com que o projeto seja otimizado [1] [2] [4] [24].

Efetua-se o roteamento dos comprimentos de onda, levando em consideração os nós com conversão, conforme a configuração ilustrada na Figura 5.5;

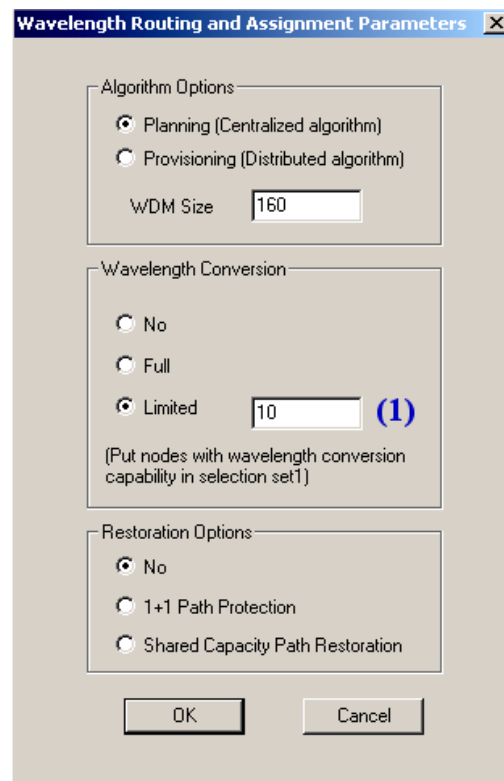


Figura 5.5 – Configuração do roteamento com conversão

Onde:

- (1) A adição de conversão limitada com variação igual a 10 é a única exceção em relação à Figura 5.4. Ou seja, caso o comprimento de onda recebido tenha valor igual a 20, a saída do nó pode variar seu valor entre 15 e 25. O resultado dessa configuração é apresentado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Resultado do roteamento com conversão

Nº do maior CO utilizado na rede:		36
Índice de utilização da rede:		320
Índice de bloqueio de CO:		325
Enlace	Nº do maior CO utilizado	Nº de COs utilizados
N1_N2	36	36
N1_N5	36	36
N2_N3	27	27
N2_N4	28	28
N3_N4	22	21
N3_N5	34	34
N4_N5	36	36
N4_N6	34	34
N5_N6	36	36
N6_N1	36	32

Resultando em uma pequena melhora nos índices e em uma otimização na utilização das cargas dos enlaces da rede de acordo com a simulação [1] [2] [4] [24].

5.2. SIMULAÇÃO DE REDES ÓPTICAS ESTÁTICAS E DINÂMICAS

Referindo-se à rede hipotética com seis nós, cuja matriz de tráfego é apresentada na Tabela 5.1, e às camadas do servidor e do cliente ilustradas na Figura 5.1, será efetuada a seguinte simulação:

Simulação de duas redes, sendo uma delas com modelo de roteamento estático e a outra com roteamento dinâmico, utilizando os algoritmos centralizados/distribuídos do VPItransportMaker™.

Neste caso, pode-se apresentar dois tipos de algoritmos para o roteamento de comprimento de onda em um sistema WDM:

- O centralizado, que é utilizado quando existe conhecimento global da rede, incluindo os nós e os enlaces, tendo como objetivo otimizar o número de comprimentos de onda utilizados na rede.
- O distribuído, sendo utilizado quando novas demandas devem ser previstas e estas surgirem aleatoriamente na rede [2] [4].

Seguindo esse raciocínio, a primeira simulação será de uma rede com algoritmo centralizado. Os passos são os mesmos apresentados na simulação 5.1 quanto à topologia da camada da fibra (Figura 5.1), matriz de tráfego (Tabela 5.1) e topologia OMS (Figura 5.3), porém a configuração do roteamento de comprimento de onda será realizada conforme ilustrado na Figura 5.6.

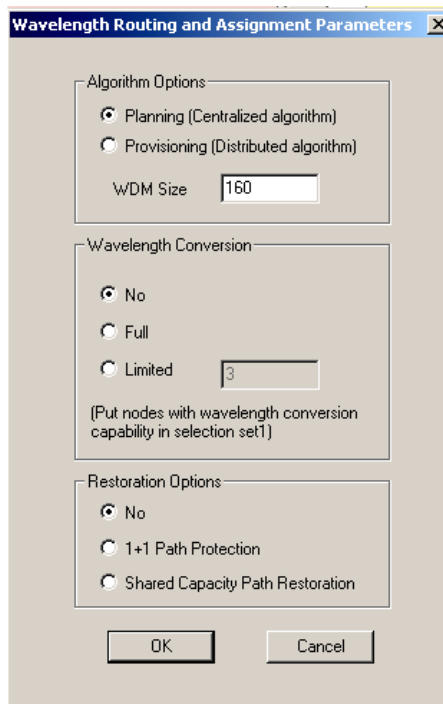


Figura 5.6 – Configuração do roteamento dos comprimentos de onda utilizando algoritmo centralizado

Os resultados obtidos com este tipo de roteamento são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Resultado do roteamento de comprimento de onda

Nº do maior CO utilizado na rede:		37
Índice de utilização da rede:		317
Índice de bloqueio de CO:		344
Enlace	Nº do maior CO utilizado	Nº de COs utilizados
N1_N2	37	36
N1_N5	37	37
N2_N3	35	26
N2_N4	31	25
N3_N4	30	21
N3_N5	35	35
N4_N5	33	33
N4_N6	32	32
N5_N6	37	37
N6_N1	37	35

Efetua-se o mesmo roteamento de comprimento de onda, considerando a utilização do algoritmo distribuído, de acordo com a respectiva configuração ilustrada na Figura 5.7.

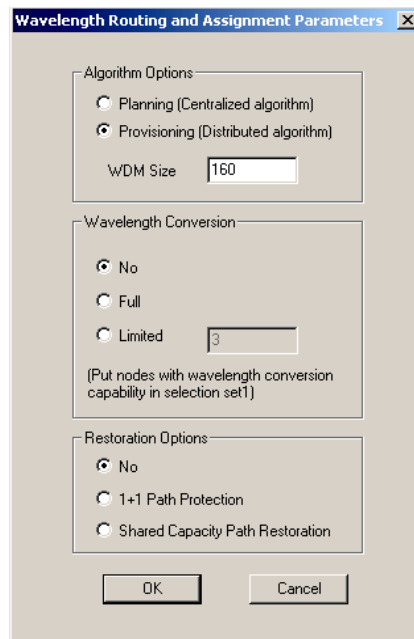


Figura 5.7 – Configuração do roteamento dos comprimentos de onda utilizando algoritmo distribuído

Neste caso os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Resultado do roteamento de comprimento de onda

Nº do maior CO utilizado na rede:		68
Índice de utilização da rede:		235
Índice de bloqueio do CO:		263
Enlace	Nº do maior CO utilizado	Nº de COs utilizados
N1 N2	24	24
N1 N5	68	68
N2 N3	23	17
N2 N4	21	20
N3 N4	22	13
N3 N5	22	22
N4 N5	18	13
N4 N6	23	23
N5 N6	21	21
N6 N1	21	14

O emprego de ambos algoritmos depende da utilização da rede. No caso do algoritmo centralizado, o objetivo é otimizar o número de comprimentos de onda utilizados em um sistema WDM, visto que são conhecidas as condições gerais da rede.

Já o algoritmo distribuído, utiliza o tamanho WDM, indicado na configuração do roteamento, para prever comprimentos de onda para futuras demandas.

A plataforma de simulação adotada não permite análise de uma rede perfeitamente dinâmica, e sim uma rede estática com uma certa folga em seu projeto. Essa folga é devido à previsão de futuras demandas, segundo o algoritmo distribuído, onde é realizado também a atribuição de comprimento de onda para essas respectivas demandas, elevando assim o número de comprimentos de onda necessários para a configuração da rede [1] [2] [4].

5.3. SIMULAÇÃO DE DIFERENTES TIPOS DE ROTEAMENTO EM UMA REDE ÓPTICA

Neste tópico, toma-se como referência os critérios iniciais das simulações anteriores (Tabela 5.1, Figura 5.1 e Figura 5.3), adotando-se também a respectiva configuração dos comprimentos e confiabilidades dos enlaces, conforme apresentado na Tabela 5.6, o qual será bastante importante na obtenção de diferentes rotas das conexões segundo os algoritmos distintos utilizados pelo *software*.

Tabela 5.6 – Configuração das distâncias e confiabilidades dos enlaces da rede

Enlace	Distância (Km)	Confiabilidade (%)
N1 N2	5	100
N6 N1	5	75
N2 N3	50	50
N3 N4	20	80
N3 N5	10	100
N4 N5	5	25
N5 N6	12	100

As principais metas nesta simulação envolvem a seguinte descrição:

Simulação de roteamentos em uma determinada rede óptica, com características intrínsecas distintas.

O *software VPItransportMaker™* fornece três opções para o roteamento em uma rede óptica com configuração em malha, tais como:

- **Mínimo Salto (*Minimal Hop*):** Indica a realização de um roteamento por um caminho que tenha o menor número de nós. Caso sejam obtidas rotas com o mesmo número de saltos, escolhe-se a que possui o percurso que apresentar menor distância.

- **Menor Percurso (*Shortest Length*):** Efetua o roteamento considerando o menor percurso da rota através de cálculos do atributo da distância do enlace da rede. Caso sejam obtidas rotas com o mesmo valor da distância, escolhe-se a que possui o menor número de saltos.

- **Máxima Confiabilidade (*Maximal Reliability*):** Representa o roteamento realizado via um caminho com maior confiabilidade baseado no respectivo atributo do enlace. Caso rotas sejam obtidas com o mesmo valor de confiabilidade, opta-se pela que possui o menor percurso ou menor número de saltos.

Com esses argumentos, será realizado o roteamento das demandas do cliente baseando-se no critério de mínimo salto, considerando a configuração ilustrada na Figura 5.8.

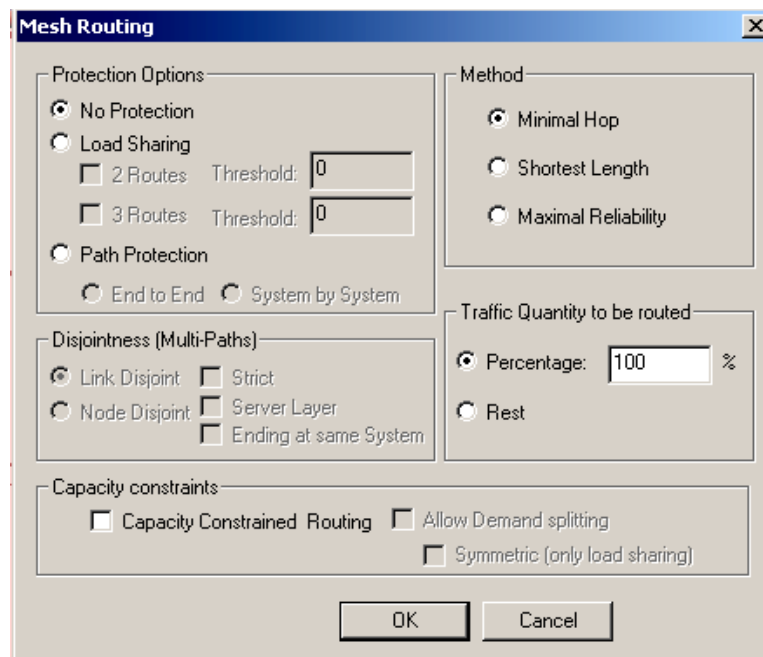


Figura 5.8 – Configuração do roteamento considerando o método de mínimo salto

Do mesmo modo, será efetuado um novo roteamento considerando o critério do menor percurso, de acordo com a configuração ilustrada na Figura 5.9.

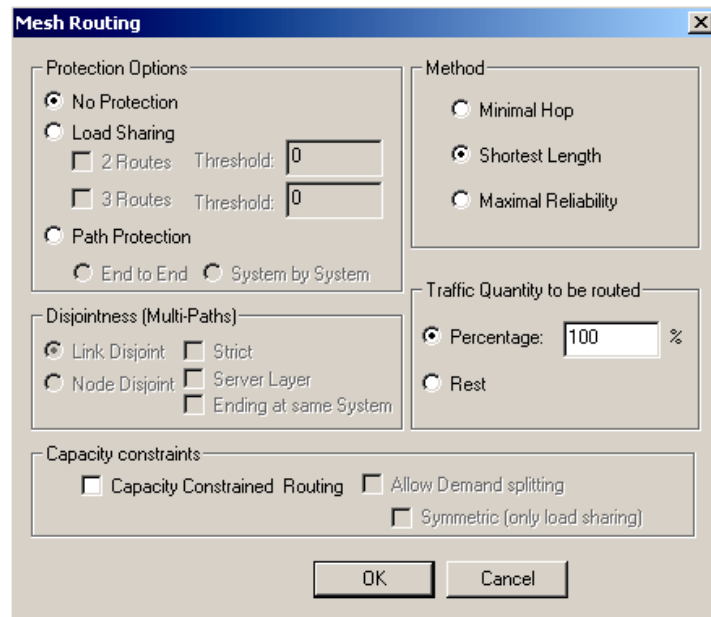


Figura 5.9 – Configuração do roteamento considerando o método de menor percurso

E, por último, será executado o roteamento considerando o critério de máxima confiabilidade dos enlaces da rede conforme a configuração ilustrada na Figura 5.10.

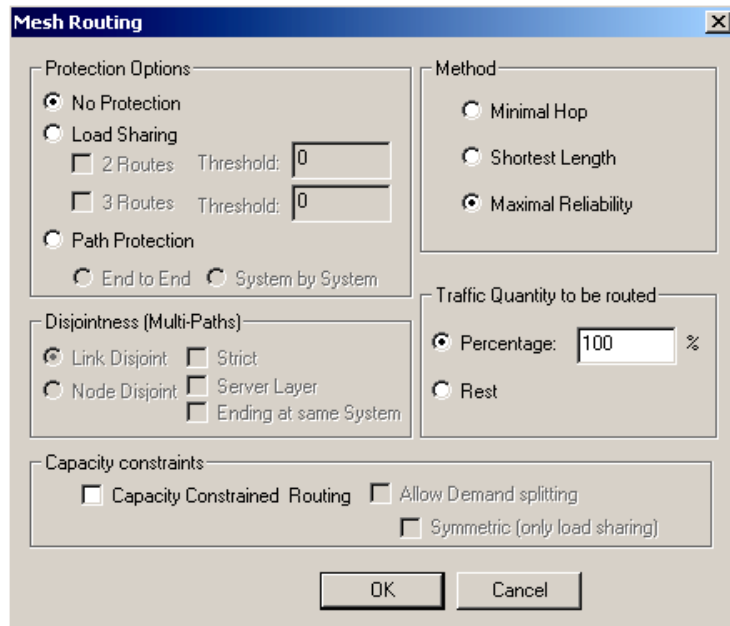


Figura 5.10 – Configuração do roteamento considerando o método de máxima confiabilidade

De posse das três configurações ilustradas, desde a Figura 5.8 até a Figura 5.10, serão analisados dois caminhos ópticos das demandas do cliente, ilustrados na Figura 5.11, e as possíveis diferenças entre as respectivas simulações.

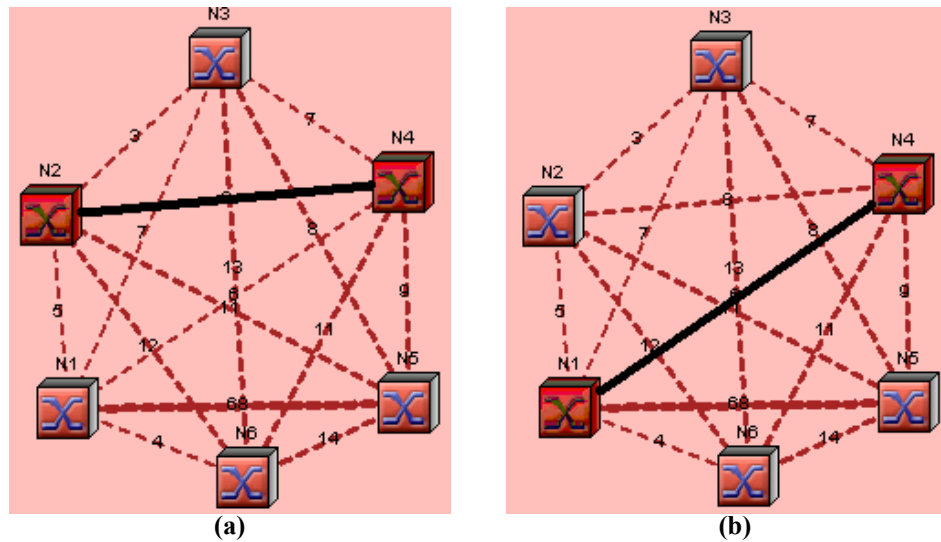


Figura 5.11 – Análise de duas demandas do cliente: (a) N2-N4 e (b) N1-N4

O roteamento, considerando o critério de mínimo salto na camada do servidor para as respectivas demandas em análise, é ilustrado na Figura 5.12.

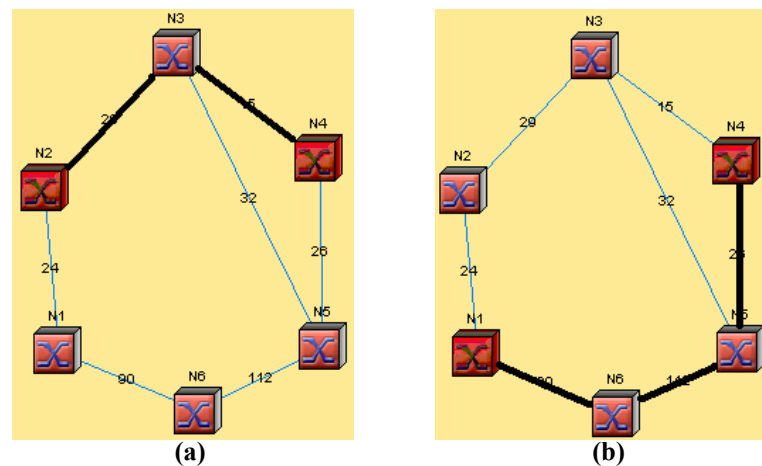


Figura 5.12 – Roteamento na camada do servidor das demandas: (a) N2-N4 e (b) N1-N4, utilizando o critério de mínimo salto

No caso (a), observa-se o roteamento realizado considerando o menor número de saltos, porém no caso (b), devido à presença de duas rotas alternativas (N1-N2-N3-N4 e N1-N6-N5-N4) com mesmo número de saltos, de acordo com a Tabela 5.6, optou-se pela rota com menor distância concordando com o critério utilizado pelo próprio algoritmo.

O roteamento, na camada do servidor para as respectivas demandas em análise, é ilustrado na Figura 5.13, utilizando o critério de menor percurso.

CAPÍTULO VI

6. CRITÉRIOS DE PROTEÇÃO E TOPOLOGIAS DE REDE

6.1. ANÁLISE DOS DIFERENTES CRITÉRIOS DE PROTEÇÃO UTILIZADOS EM UMA REDE ÓPTICA EM MALHA

Com base em uma rede hipotética com seis nós, na matriz de tráfego referente à Tabela 5.1, nas camadas do servidor, referente à camada OMS, e do cliente (Figura 5.1), e à respectiva configuração das distâncias e confiabilidades dos enlaces, fornecida na Tabela 5.6, será realizada a seguinte simulação:

Implementar os critérios de proteção, disponíveis na plataforma de simulação, em uma rede óptica em malha e compará-la com a respectiva rede sem proteção.

A plataforma de simulação oferece alguns critérios de proteção, em implementações de redes em malha, tais como: Proteção do caminho (*Path Protection*) e compartilhamento de carga, com os respectivos limiares, além de considerar algumas restrições para o caso de realização de um novo roteamento da rede ou de roteamento em uma rede pré-existente.

Possui também uma opção denominada de recuperação de malha com capacidade compartilhada (SCMR - *Shared Capacity Mesh Restoration*), o qual permite analisar a capacidade não utilizada em um enlace para possível recuperação do tráfego caso se detecte alguma falha em um nó ou em um enlace da rede [2] [4].

No processo de simulação, são adotados valores altos das capacidades dos enlaces visando analisar exclusivamente como o algoritmo de proteção e roteamento do *software* realiza as respectivas funções de Proteção [1 + 1] e SCMR.

Baseando-se nesses requisitos de configuração, será realizado o roteamento das demandas de tráfego na camada OMS sem mecanismos de proteção.

Os passos para criação da camada OMS, e respectivas configurações, são semelhantes aos passos apresentados na simulação 5.1.

As opções de proteção e roteamento, citadas anteriormente, são ilustradas na Figura 6.1.

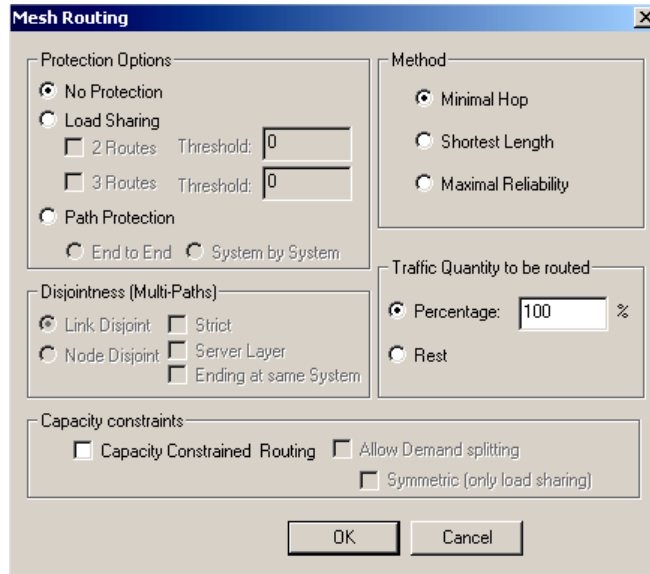


Figura 6.1 – Configuração do roteamento com critério de mínimo salto e sem proteção em uma rede óptica em malha

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Resultado do roteamento em uma rede óptica em malha sem proteção

Número de enlaces:	7			
Tráfego total:	328			
Capacidade livre total:	3499672			
Tráfego médio:	46,86			
Capacidade livre média do enlace:	499953,14			
Grau de utilização médio do enlace:	0,01%			
Grau de utilização máximo do enlace:	0,02%	Enlace:	N5-N6	
Grau de utilização mínimo do enlace:	0,00%	Enlace:	N3-N4	
Enlace	Capacidade	Tráfego	Capacidade livre	Utilização [%]
N1_N2	500000	24	499976	0
N1_N5	500000	29	499971	0,01
N2_N3	500000	15	499985	0
N2_N6	500000	32	499968	0,01
N3_N4	500000	26	499974	0,01
N3_N5	500000	112	499888	0,02
N4_N5	500000	90	499910	0,02

A Tabela 6.1 indica que existe na rede capacidade disponível para a recuperação de possíveis falhas com a utilização da SCMR, além do fato de que na presença de falhas, essa rede não apresenta nenhuma proteção.

O critério de proteção do caminho possui duas opções:

- **Enlace Diferente (*Link Disjoint*):** Onde o mesmo enlace não pode ser utilizado nos caminhos de proteção e trabalho.
- **Nó Diferente (*Node Disjoint*):** Onde nem os enlaces, nem os nós, são iguais para os caminhos de proteção e trabalho, sendo mais geral que o caso anterior.

A opção de proteção do caminho com enlace diferente é conhecida como Proteção [1+1].

A Figura 6.2 ilustra a configuração do emprego da proteção do caminho com enlace diferente.

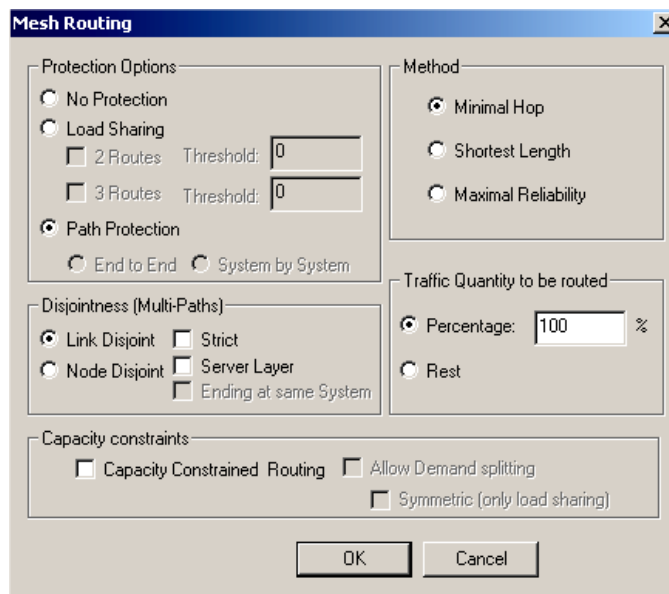


Figura 6.2 – Configuração do roteamento com critério de mínimo salto e com proteção do caminho com opção de enlace diferente em uma rede óptica em malha

Obtendo o resultado apresentado na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Resultado do roteamento em uma rede óptica em malha com Proteção [1+1]

Número de enlaces:	7
Tráfego total:	907
Capacidade livre total:	3499093
Tráfego médio:	129,57
Capacidade livre média do enlace:	499870,43
Grau de utilização médio do enlace:	0,03%
Grau de utilização máximo do enlace:	0,03%

Tabela 6.2 – Resultado do roteamento em uma rede óptica em malha com Proteção [1+1]

Enlaces:		N1-N2, N2-N3, N5-N6 e N6-N1		
Grau de utilização mínimo do enlace:		0,01%		
Enlaces:		N3-N4 e N4-N5		
Enlace	Capacidade	Tráfego	Capacidade livre	Utilização [%]
N1_N2	500000	162	499838	0,03
N2_N3	500000	162	499838	0,03
N3_N4	500000	49	499951	0,01
N3_N5	500000	161	499839	0,03
N4_N5	500000	49	499951	0,01
N5_N6	500000	162	499838	0,03
N6_N1	500000	162	499838	0,03

O algoritmo de Proteção [1+1], empregado pela ferramenta de simulação, trabalha com a capacidade do enlace. Ele faz com que ocorra um aumento do tráfego nos mesmos, devido ao tráfego roteado para a fibra reserva fazer parte do próprio enlace, contribuindo para uma maior utilização dos enlaces e diminuição da capacidade livre de cada um.

Pode-se ainda, a partir do roteamento anterior, aplicar a opção da SCMR com o método de recuperação do enlace conforme ilustrado na Figura 6.3.



Figura 6.3 – Configuração do critério da SCMR com método de recuperação do enlace

A opção SCMR se baseia em uma capacidade adicional exigida em cada enlace em razão de habilitar um novo roteamento das demandas afetadas por possível ocorrência de falha. Toma como referência o compartilhamento da capacidade dos enlaces na recuperação dos caminhos ópticos das demandas.

Possui duas opções:

- **Recuperação do Enlace (*Link Restoration*):** No caso de falha em um enlace, um novo roteamento é realizado via o menor desvio entre as extremidades do enlace afetado, visando recuperar a capacidade de carga do enlace.
- **Recuperação do Caminho (*Path Restoration*):** Baseia-se em uma reconfiguração ponto a ponto dos caminhos ópticos individuais afetados por uma falha em um enlace.

A diferença é que na recuperação do caminho cada um dos caminhos ópticos será recuperado separadamente, enquanto que a do enlace recupera a carga do tráfego do enlace em que ocorreu a falha.

Realizando a simulação empregando a opção de recuperação do enlace, obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Resultado do roteamento em uma rede óptica em malha com Proteção [1+1] empregando o método da SCMR com recuperação do enlace

Carga total do tráfego:		907.00	
Capacidade total de recuperação exigida:		1132.00	
Capacidade total exigida:		2039.00	
Enlace	Carga do tráfego	Capacidade de recuperação exigida	Tráfego total
N1 N2	162.0	162.0	324.0
N2 N3	162.0	162.0	324.0
N3 N4	49.0	161.0	210.0
N3 N5	161.0	162.0	323.0
N4 N5	49.0	161.0	210.0
N5 N6	162.0	162.0	324.0
N6 N1	162.0	162.0	324.0

Fornecendo uma capacidade de recuperação, em um enlace falho, com um respectivo aumento do tráfego total. Isso porque o algoritmo realiza a simulação prevendo falhas em todos os enlaces, fazendo com que seja exigida capacidade adicional em cada um deles de modo a recuperar qualquer demanda no caso de uma possível falha.

Finalmente, aplica-se o critério da SCMR com recuperação do caminho conforme configuração ilustrada na Figura 6.4.

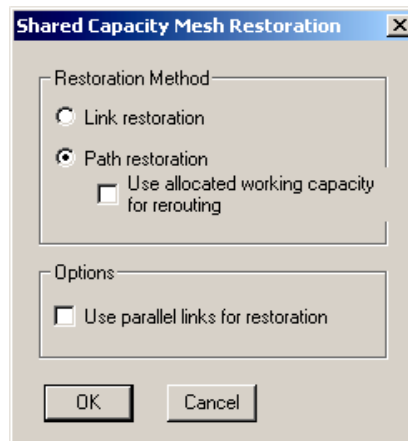


Figura 6.4 – Configuração do critério da SCMR com método de recuperação do caminho

Esta configuração fornece os resultados apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Resultado do roteamento em uma rede óptica em malha com Proteção [1+1] empregando o método da SCMR com recuperação do caminho

Carga total do tráfego:		907.00	
Capacidade total de recuperação exigida:		727.00	
Capacidade total exigida:		1634.00	
Enlace	Carga do tráfego	Capacidade de recuperação exigida	Tráfego total
N1_N2	162.0	136.0	298.0
N2_N3	162.0	141.0	303.0
N3_N4	49.0	41.0	90.0
N3_N5	161.0	108.0	269.0
N4_N5	49.0	41.0	90.0
N5_N6	162.0	141.0	303.0
N6_N1	162.0	119.0	281.0

Concluindo, essa forma de configuração da SCMR exigiu uma menor capacidade de recuperação em relação à Tabela 6.3. Isso pode ser explicado devido à diferença entre as duas configurações, onde em caso de falha a recuperação do enlace roteia toda a carga do tráfego do enlace através do menor desvio entre o enlace que falhou, enquanto que a do caminho realiza o roteamento de cada caminho óptico pertencente ao enlace individualmente, reduzindo desse modo a capacidade adicional de recuperação exigida [1] [2] [3] [4].

6.2. IMPLEMENTAÇÃO DAS ARQUITETURAS EM ANEL BLSR/4 E UPSR

Utilizando a possibilidade de projetar redes em anel com diferentes critérios de configuração disponíveis no programa, pode-se desta forma, efetuar a seguinte simulação:

Implementação de redes em anel BLSR/4 e UPSR, desde os passos que compreendem suas configurações, até a apresentação de seus respectivos resultados.

A plataforma de simulação oferece o recurso de projeto de redes em anel com configurações do tipo BLSR/4, BLSR/2 e UPSR, além da entrada dos valores de custo dos equipamentos necessários em cada etapa do projeto, elaboração dos respectivos relatórios de custos, análise de desempenho e possibilidade de otimização da topologia existente.

O processo tem início com o projeto de uma rede BLSR/4, o qual se caracteriza basicamente de uma rede em anel capaz de transmitir informações em ambas as direções dos enlaces, devido à sua própria configuração de rede. O primeiro passo da simulação é o de ilustrar as camadas do servidor e do cliente (Figura 6.5), e as demandas de tráfego (Tabela 6.5), o qual serão comuns às simulações seguintes e obtidas de acordo com as simulações presentes no *VPItransportMaker*TM [1] [3].

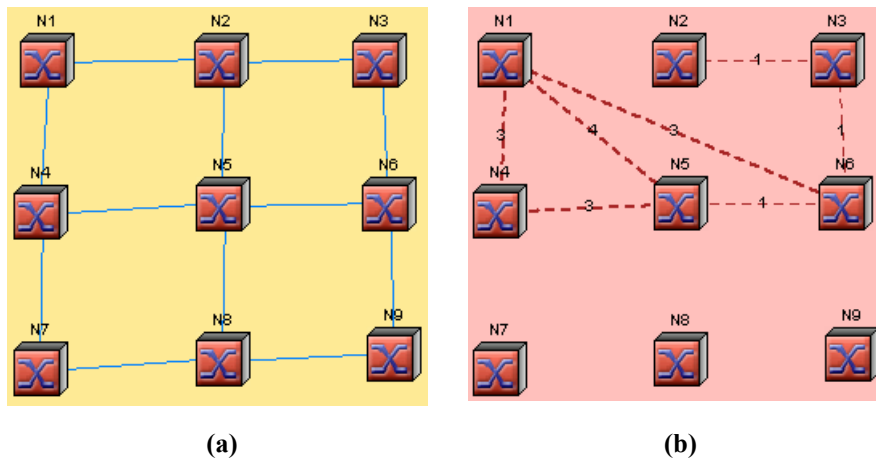


Figura 6.5 – Camadas (a) do servidor e (b) do cliente

Tabela 6.5 – Matriz de tráfego da rede em anel

Fonte/Destino	Quantidade STM16/OC48
N2-N3	1
N3-N6	1
N5-N6	1
N1-N5	4
N1-N4	3
N4-N5	3
N1-N6	3

Baseando-se nessas informações, o passo seguinte é definir a topologia da rede em anel conforme ilustrado na Figura 6.6.

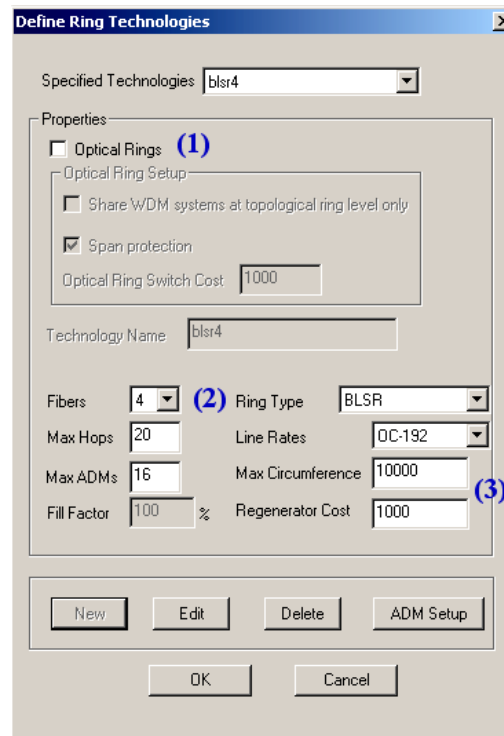


Figura 6.6 – Definição da topologia em anel BLSR/4

Apresentando uma rede BLSR/4 configurada da seguinte maneira:

- (1) Especifica tecnologia em anel óptica comutada a comprimento de onda, sendo que na análise atual, considera-se tecnologia Sonet/SDH para ilustrar os critérios de proteção e de funcionamento descritos no decorrer do trabalho;
- (2) Ilustra a configuração da rede adotada para o projeto;
- (3) Representa a entrada de parâmetros relacionados ao custo de equipamentos e respectivas restrições que podem ser consideradas.

Após estabelecer o tipo de rede a ser projetado, uma opção do *software*, denominada de projetista automático do anel (*Ring Automatic Designer*), é responsável por executar o projeto, tomando como referência as opções de configuração ilustradas na Figura 6.7;

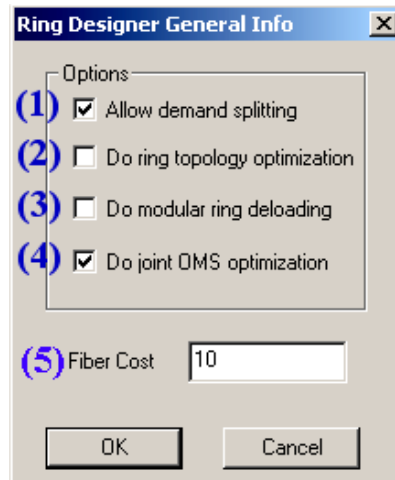


Figura 6.7 – Opções do projeto de uma rede BLSR/4

Onde:

- (1) Permite que a demanda possa ser dividida em várias demandas com taxa de transmissão inferior, mas com mesmo valor entre elas, por exemplo: Uma demanda igual a 8 OC-48 pode ser dividida em 8 demandas com taxa de 1 OC-48, sendo que ela não pode ser dividida em unidades menores que a própria taxa de transmissão considerada;
- (2) Remove enlaces desnecessários no processo de geração dos ciclos dos anéis, caracterizando um processo de otimização da topologia;
- (3) Remove anéis menos utilizados, atribuindo suas demandas a anéis com capacidade livre de tráfego;
- (4) Especifica se é realizada a otimização simultânea do projeto do anel na camada Sonet/SDH e dos sistemas WDM na camada OMS, caracterizando-se também como um processo de geração de sistemas WDM nesta camada. Os anéis gerados serão transportados através de sistemas WDM, sendo estes roteados através de enlaces de fibra.
- (5) Representa o custo por unidade de comprimento da fibra.

O próximo passo caracteriza-se por estabelecer critérios de custos dos equipamentos utilizados no projeto para posterior análise de viabilidade do mesmo, conforme ilustrado na Figura 6.8 e na Figura 6.9.

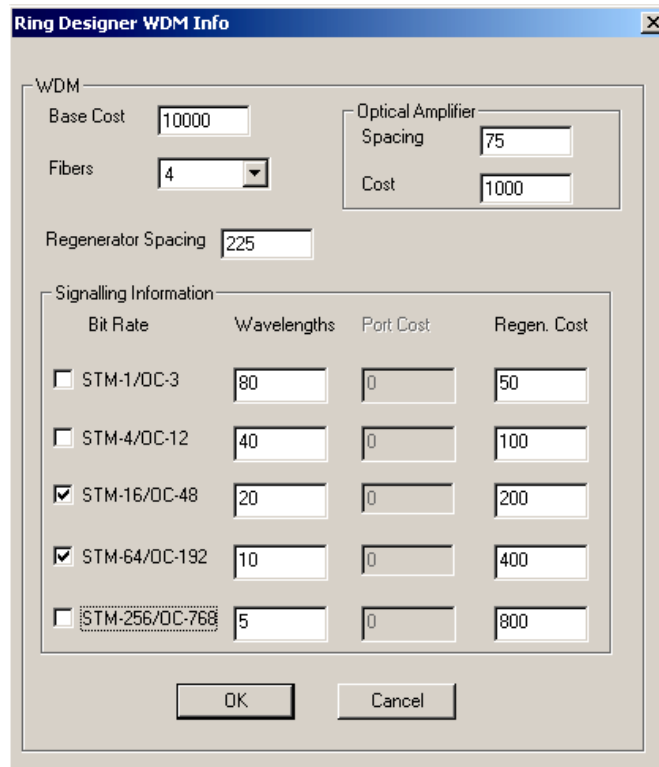


Figura 6.8 – Critérios de custo do equipamento WDM

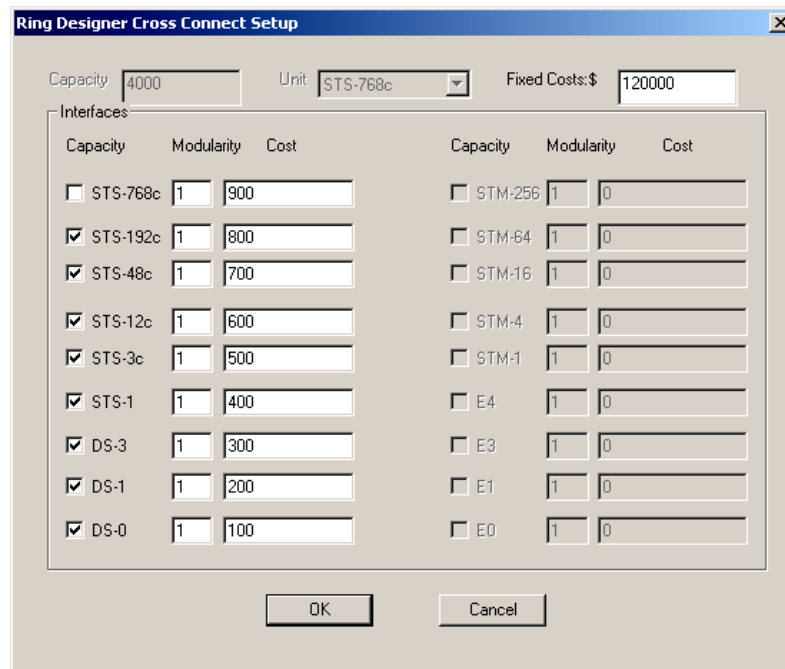


Figura 6.9 – Critérios de custo do equipamento roteador

Após os passos de configuração da topologia da rede, consegue-se o resultado apresentado na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Resultado da simulação de uma rede em anel BLSR/4

Custo WDM:	US\$ 10.000,00	
Custo OA:	US\$ 1.000,00	
Taxa de bit	Comprimentos de onda	Custo do regenerador
OC-48	20	US\$ 200,00
OC-192	10	US\$ 400,00
Camada do anel		
Anéis topológicos:	3	
Anéis modulares:	3	
Número de ADMs:	9 OC-192	
Número de regeneradores:	14 OC-192	
Custo do ADM:	US\$ 1.102.400,00	
Custo do regenerador:	US\$ 14.000,00	
Camada OMS		
Número de WDMs:	22	
Número de OAs:	22	
Custo WDM:	US\$ 220.000,00	
Custo OA:	US\$ 22.000,00	
Custo da fibra:	US\$ 13.438,80	

Além de apresentar os custos e as quantidades dos equipamentos necessários à implantação da rede, observa-se a criação de anéis topológicos e modulares. Tais anéis topológicos são selecionados para assegurar um alcance completo da rede, representando uma camada base, enquanto que os anéis modulares são necessários para transportar as demandas, indicando a camada acima dos anéis topológicos. Na Figura 6.10 ilustra-se os anéis topológicos gerados pela simulação.

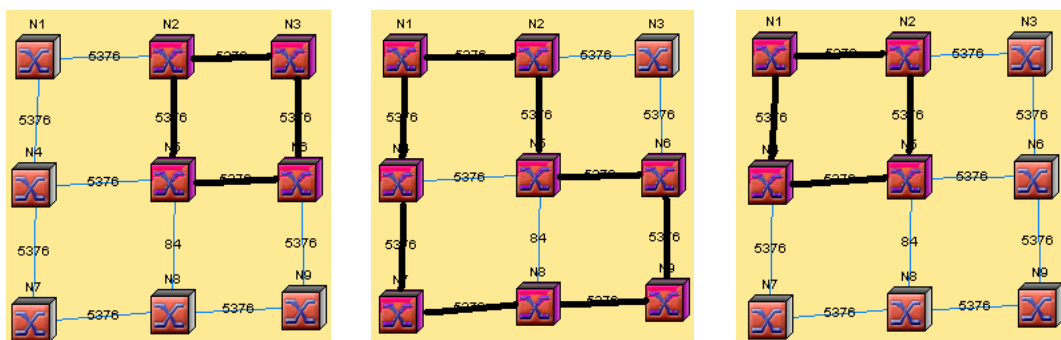


Figura 6.10 – Anéis topológicos

Do mesmo modo, ilustra-se na Figura 6.11 os anéis modulares gerados pela simulação.

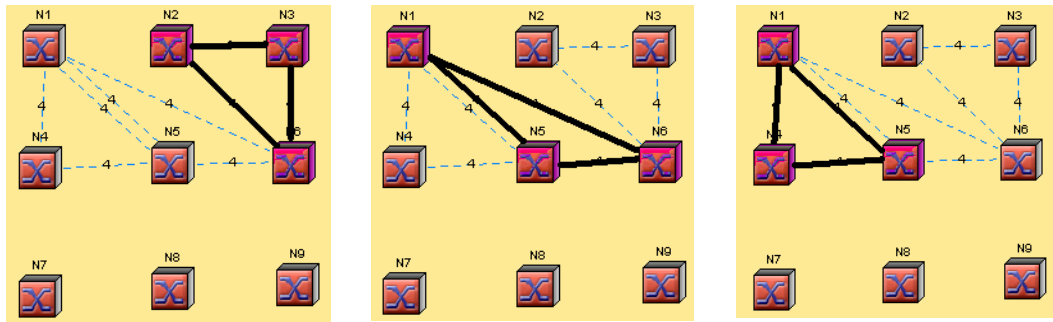


Figura 6.11 – Anéis modulares

Para a simulação de uma rede em anel UPSR, as duas diferenças, em relação ao processo anterior, estão na definição inicial da topologia da rede (Figura 6.12) e na configuração de custo para duas ao invés de quatro fibras (Figura 6.13), devido ao esquema da rede UPSR, fazendo com que as outras configurações de equipamentos e custos tenham a mesma consideração para ambos projetos.

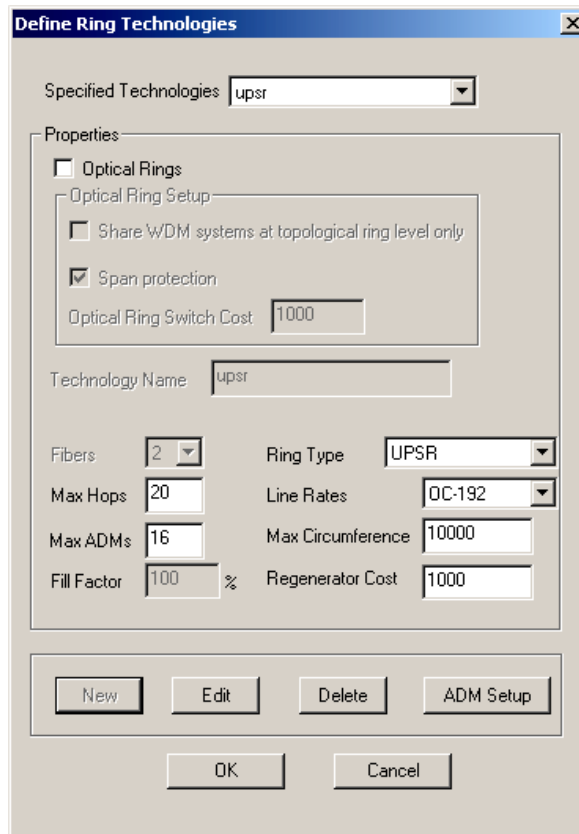


Figura 6.12 – Definição da topologia em anel UPSR

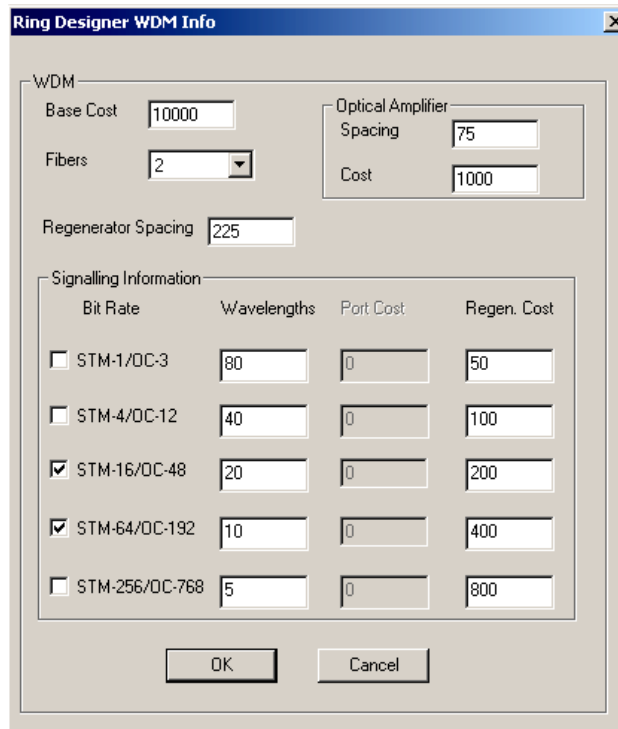


Figura 6.13 – Configuração de custo da rede UPSR considerando duas fibras

Neste caso, os resultados são apresentados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Resultado da simulação de uma rede em anel UPSR

Custo WDM:	US\$ 10.000,00	
Custo OA:	US\$ 1.000,00	
Taxa de bit	Comprimentos de onda	Custo do regenerador
OC-48	20	US\$ 200,00
OC-192	10	US\$ 400,00
Camada do anel		
Anéis topológicos:	3	
Anéis modulares:	6	
Número de ADMs:	13 OC-192	
Número de regeneradores:	19 OC-192	
Custo do ADM:	US\$ 1.582.400,00	
Custo do regenerador:	US\$ 19.000,00	
Camada OMS		
Número de WDMs:	22	
Número de OAs:	22	
Custo WDM:	US\$ 220.000,00	
Custo OA:	US\$ 22.000,00	
Custo da fibra:	US\$ 6.719,04	

Onde os anéis topológicos são ilustrados na Figura 6.14, e os modulares na Figura 6.15.

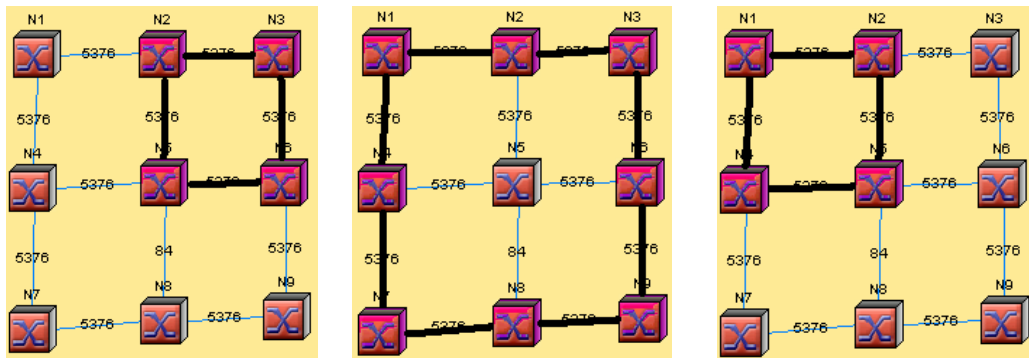


Figura 6.14 – Anéis topológicos

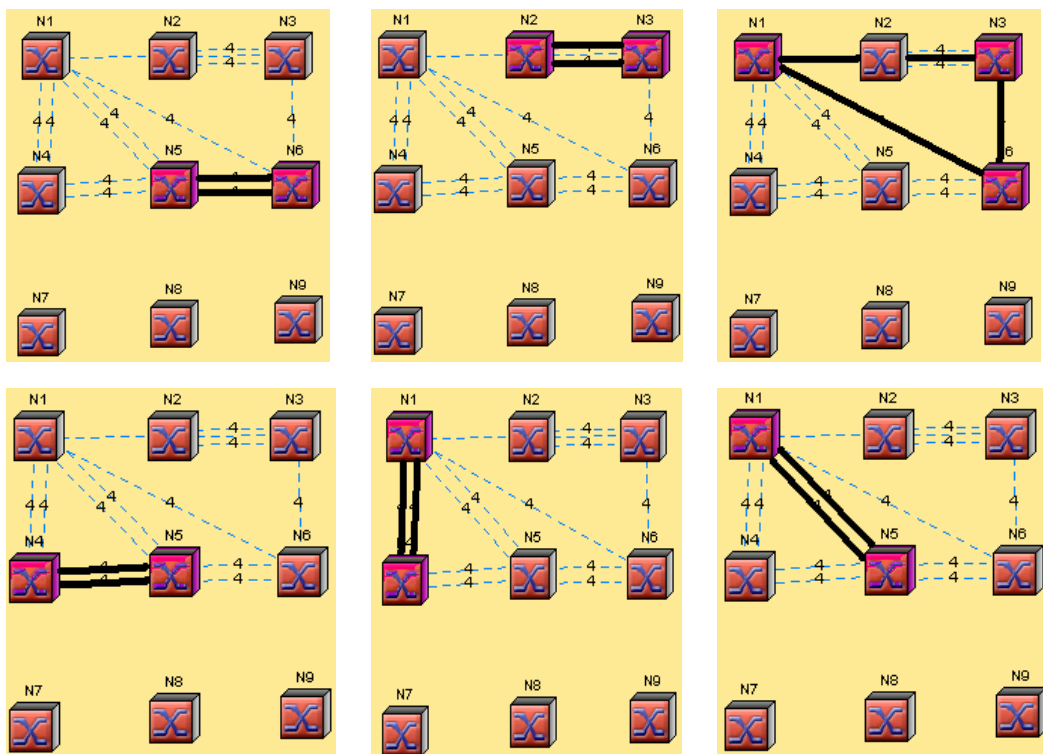


Figura 6.15 – Anéis modulares

Essas simula es de redes em anel BLSR/4 e UPSR visam ilustrar o processo de simula o do *software* utilizado, os parâmetros de entrada referentes ao tipo de tecnologia e os custos individuais dos equipamentos exigidos, fornecendo resultados com o objetivo de otimiza o da topologia e possível redu o nos custos do projeto [1] [2] [4].

6.3. COMPARAÇÃO ENTRE AS ARQUITETURAS EM ANEL BLSR/4 E BLSR/2

A título de comparação entre diferentes arquiteturas das redes ópticas, com os recursos da ferramenta adotada, a seguinte simulação pode ser realizada:

Projeto e comparação de redes em anel BLSR/4 e BLSR/2.

Utilizando as camadas do servidor e do cliente da Figura 6.5, a matriz de tráfego da Tabela 6.5, os critérios utilizados na simulação 6.2 referentes aos custos dos equipamentos, e o resultado da simulação da rede BLSR/4 apresentado na Tabela 6.6, a seguinte simulação de uma rede BLSR/2 será efetuada de acordo com a configuração ilustrada na Figura 6.16.

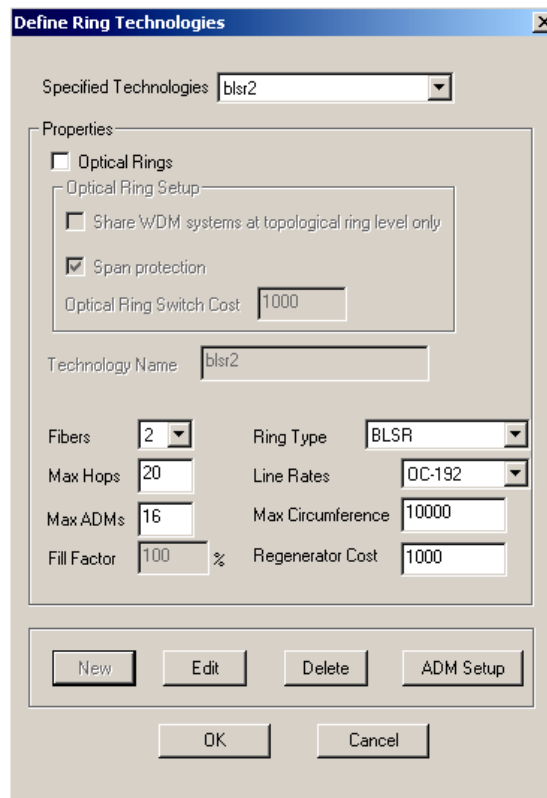


Figura 6.16 – Definição da topologia em anel BLSR/2

Os passos de configuração da rede são similares aos das simulações efetuadas no tópico 6.2, com uma diferença no cálculo do custo da rede em relação à configuração BLSR/4 conforme ilustrado na Figura 6.17.

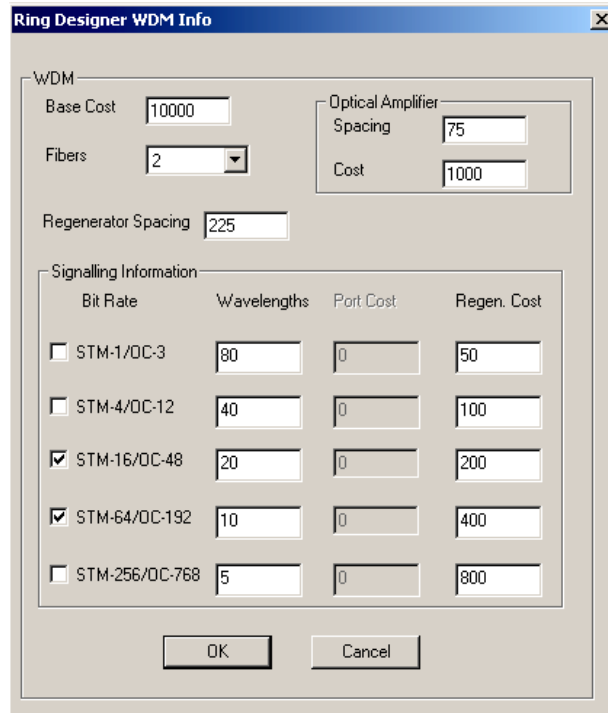


Figura 6.17 – Configuração de custo do equipamento WDM

Com isso, obtem-se o resultado apresentado na Tabela 6.8 para a rede BLSR/2.

Tabela 6.8 – Resultado da simulação de uma rede em anel BLSR/2

Custo WDM:	US\$ 10.000,00	
Custo OA:	US\$ 1.000,00	
Taxa de bit	Comprimentos de onda	Custo do regenerador
OC-48	20	US\$ 200,00
OC-192	10	US\$ 400,00
Camada do anel		
Anéis topológicos:	3	
Anéis modulares:	4	
Número de ADMs:	12 OC-192	
Número de regeneradores:	8 OC-192	
Custo do ADM:	US\$ 1.462.400,00	
Custo do regenerador:	US\$ 8.000,00	
Camada OMS		
Número de WDMs:	14	
Número de OAs:	14	
Custo WDM:	US\$ 140.000,00	
Custo OA:	US\$ 14.000,00	
Custo da fibra:	US\$ 4.196,00	

A Tabela 6.8 permite visualizar uma economia significativa em alguns equipamentos e principalmente no valor da fibra implantada, visto que a configuração BLSR/4 possui duas vezes mais quantidade de fibra que a BLSR/2.

A simulação fornece três anéis topológicos ilustrados na Figura 6.18 e quatro modulares na Figura 6.19.

Embora a configuração BLSR/2 seja mais econômica que a BLSR/4, seu esquema de proteção só trabalha com proteção de linha, enquanto que a BLSR/4 apresenta além deste, o esquema de proteção de duração entre os nós da rede [1] [2] [3] [4].

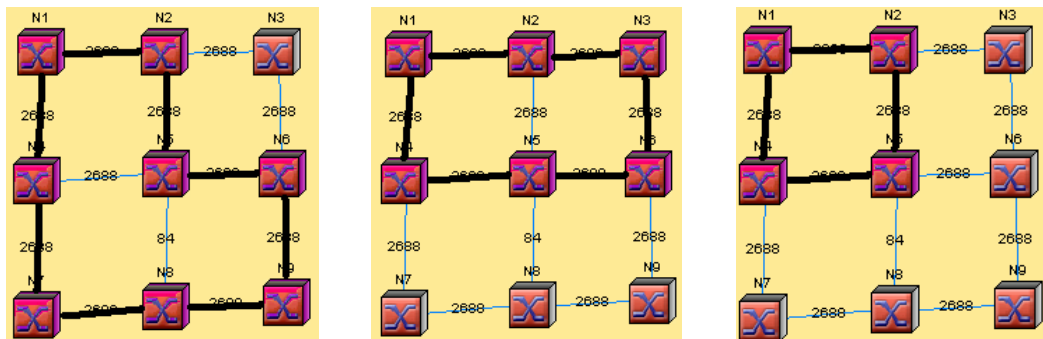


Figura 6.18 – Anéis topológicos

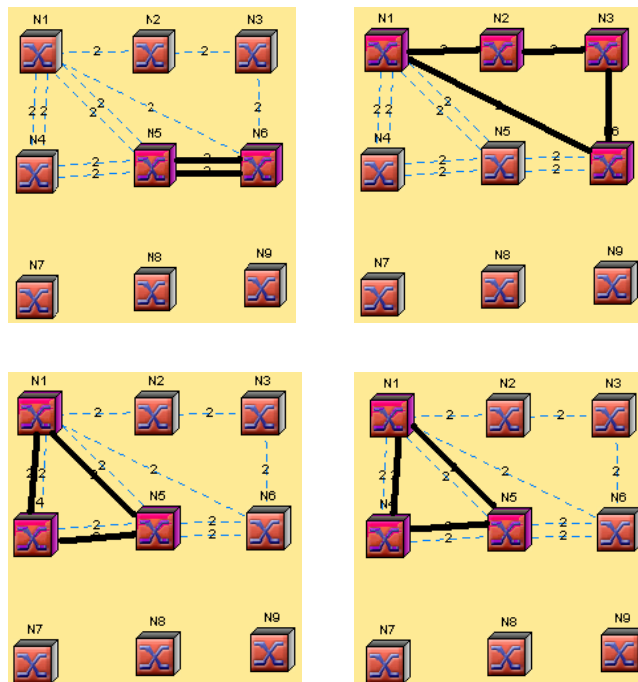


Figura 6.19 – Anéis modulares

CAPÍTULO VII

7. TENDÊNCIAS NAS REDES ÓPTICAS

7.1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de telecomunicações estão evoluindo rapidamente de modo a se adaptarem às variações nas demandas dos usuários da rede. O rápido aumento no poder de processamento dos computadores, na última década, encorajou o desenvolvimento e emprego de muitas aplicações com altas taxas de transmissão. Combinadas com o surpreendente crescimento da *internet* nos últimos anos, essas aplicações colocaram a demanda, para a largura de faixa da rede, em um novo patamar. Felizmente, no mesmo período, as operadoras revolucionaram os critérios que estavam sendo impostos para a largura de faixa [6].

Os avanços, ocorridos na tecnologia das comunicações ópticas e nos sistemas DWDM, acarretaram em um aumento na capacidade da largura de faixa, de um único enlace de fibra, para centenas de Gb/s. Entretanto, além da largura de faixa, aplicações mais recentes estão exigindo arquiteturas com comutadores e roteadores mais rápidos, permitindo que os dados possam ser enviados através da rede, via nós intermediários, em velocidades comparáveis com as velocidades que as informações são transportadas nos enlaces de fibra. O aumento esperado de aplicações envolvendo multimídia também exigirão que redes futuras forneçam maior confiabilidade e desempenho, tempos de resposta menores e garantia na entrega dos dados [10].

Para entender melhor os tipos dos serviços das demandas nas redes futuras, é preciso examinar as exigências impostas por suas respectivas aplicações. Alguns exemplos de possíveis aplicações com alta largura de faixa incluem: Vídeo telefonia, vídeo conferência, distribuição de vídeo e serviços de transferência de dados.

Atualmente, essas aplicações já existem de alguma forma ou de outra na *internet*, por isso, é razoável esperar que, quanto mais a infra-estrutura da rede evolui, mais essas aplicações se tornarão proeminentes no futuro [6] [8].

Muitas dessas aplicações podem ser caracterizadas pelas suas exigências em termos de largura de faixa, latência, tolerância a erros, multidistribuição e segurança. Portanto, essa grande variação dos tipos de tráfego requer que o projeto da rede possa oferecer uma maior variedade de serviços com níveis distintos [7].

Sistemas WDM têm sido empregados comercialmente em redes de longas distâncias, sendo a maioria deles capazes de operar dezenas de canais em cada enlace de fibra óptica. Esses sistemas constituem em uma substituição simples dos enlaces das redes WAN convencionais, oferecendo conexões WDM ponto a ponto, e exigem que o sinal em cada comprimento de onda, seja convertido para a forma eletrônica com o propósito de comutação e multiplexação em cada nó intermediário. Os custos do processamento e comutação eletrônicos, em tais sistemas, podem ser potencialmente altos. Isso pode resultar em severos congestionamentos nos nós intermediários e impedir a entrega da largura de faixa do enlace óptico ao usuário final. Em razão de fornecer taxas efetivas de Tb/s, além de limitar congestionamentos e atrasos nos nós intermediários, a próxima geração das redes WAN, assim como as redes LAN, precisa ser moldada pelas características das tecnologias ópticas mais recentes [5].

Sistemas WDM mais recentes, contendo elementos de conexão e comutação ópticos, permitirão que comprimentos de onda sejam completamente roteados através dos nós intermediários no domínio óptico, reduzindo dessa maneira a quantidade de processamento eletrônico exigido em um nó. Tais sistemas incluem redes em anel, o qual utilizam ADMs, e redes em malha roteadas a comprimentos de onda, no qual caminhos ópticos são configurados em comprimentos de onda específicos entre pares de nós [1] [10].

Para que as redes WDM, roteadas a comprimentos de onda, tornem-se comercialmente viáveis, algumas conjecturas devem ser abordadas e resolvidas, cabendo aqui salientar: (a) Desenvolver mecanismos para o controle e gerenciamento dos caminhos ópticos; (b) Empregar proteção e recuperação destes mecanismos a nível da camada óptica.

Estes sistemas também devem fornecer serviços apropriados para os protocolos da camada superior, tais como protocolo de *internet* (IP – *Internet Protocol*), ATM, Sonet e *Ethernet* [5] [8].

No mínimo, redes roteadas a comprimentos de onda devem ter ambas as capacidades de configurar caminhos ópticos estáticos, para servir como enlaces nas redes comutadas a circuito, e a capacidade de estabelecer e retirar caminhos ópticos dinamicamente, de modo a acomodar conexões comutadas a circuito completamente ópticas. Redes WDM mais avançadas podem ter a capacidade de fornecer serviços adicionais tais como multidistribuição e comutação de pacotes ópticos [1] [7].

Inicialmente, a camada WDM seria transparente aos protocolos das camadas mais altas, fornecendo serviços básicos de transporte através dos caminhos ópticos, assim como proteção para os mesmos. Na medida em que a rede evolui, novas aplicações e protocolos podem ser desenvolvidos, ocasionando em um melhor desempenho nos serviços adicionais fornecidos por ela. Essas aplicações e protocolos podem solicitar caminhos ópticos sob demanda, permitindo por completo reconfiguração dinâmica das topologias lógicas das redes, assim como conexões ponto a ponto completamente ópticas para classes de tráfego especializadas.

A *internet* está crescendo rapidamente, e o IP é esperado ser a fonte de tráfego dominante no *backbone* na próxima década. Como tal, é especialmente importante para a camada óptica oferecer serviços destinados à camada IP, fazendo com que esta camada possa obter vantagens disponibilizadas pelos serviços fornecidos pela camada óptica.

Como a *internet* continua a se expandir, é esperado que esta atenda um número crescente de aplicações, tais como: Telefonia, vídeo conferência e distribuição de vídeo. Para fornecer essas aplicações, a rede deve ser capaz de não somente fornecer a largura de faixa exigida, mas também fornecer garantias com respeito à qualidade do serviço, segurança e tolerância a falhas.

Em muitas redes de telecomunicações existentes, a estrutura (arquitetura) Sonet é utilizada para fornecer serviços tais como: Transmissão, multiplexação e proteção. Portanto, pode-se prever uma camada IP implementada sobre enlaces Sonet, e Sonet implementada sobre caminhos ópticos WDM.

Entretanto, uma aproximação alternativa, o qual tem recebido bastante atenção ultimamente, é a implementação de IP diretamente sobre a camada óptica WDM, com um número mínimo de camadas eletrônicas entre as duas. Nesse cenário, muitas das funcionalidades Sonet, tal como proteção, podem ser deslocadas para a camada IP ou WDM. Roteadores IP são então conectados via comprimentos de onda ou caminhos ópticos [7] [8] [12] [26].

7.2. REDES ÓPTICAS PASSIVAS

Essas redes são passivas em relação aos componentes utilizados, visto que eles não precisam ser energizados. A parte ativa da rede óptica passiva (PON – *Passive Optical Network*) localiza-se entre dois terminais, sendo que na maioria das vezes, compreendem o provedor de serviços e o usuário. A Figura 7.1 ilustra uma topologia PON.

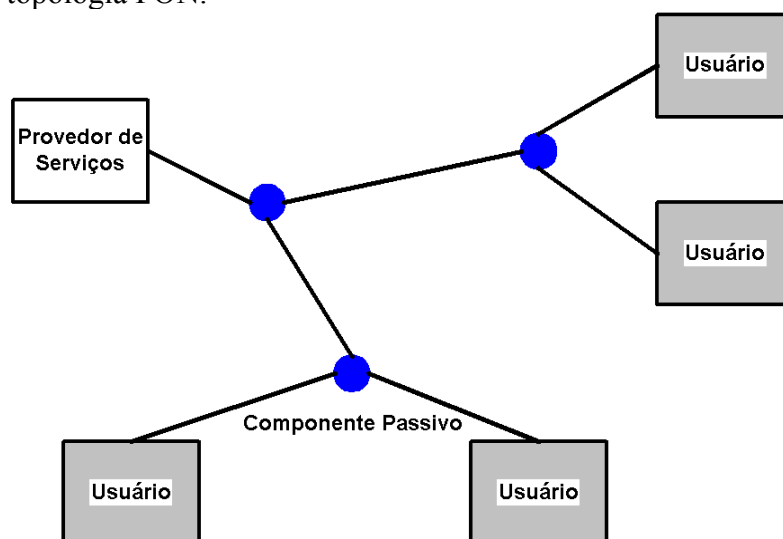


Figura 7.1 – Topologia de uma rede óptica passiva

A fibra pode estar presente em múltiplas partes da rede com o uso de divisores ópticos. Essa aproximação oferece economia significativa devido à multiplexação de várias cargas úteis (*payload*) em poucas fibras em relação à topologia convencional ponto a ponto.

O uso da tecnologia *Ethernet* e PON, em área local, reduz substancialmente o custo de fornecer enlaces de alta capacidade ao usuário.

O motivo é que componentes mais caros, ADMs Sonet e comutadores ATM, podem ser substituídos por equipamentos mais baratos, visto que muitas interfaces dos usuários não precisam de todo o poder dos atributos de Sonet e ATM.

Em alguns projetos de pesquisa, a utilização de redes PON para a transmissão de sinais e ATM para distribuição dos mesmos, tem sido intensificadas para a realização de serviços que forneçam fibra até o usuário (FTTH – *Fiber to the Home*) [5].

7.3. MULTIPROCOLO DE COMUTAÇÃO DE RÓTULO

A comutação de rótulo (LS – *Label Switching*) e o multiprotocolo de comutação de rótulo (MPLS – *Multiprotocol Label Switching*) são considerados como os componentes mais importantes das redes de transporte da terceira geração. Ao invés de utilizar um endereço destino para compor a decisão de roteamento, um número (rótulo) é associado com cada pacote. Nas redes de computadores, um rótulo é colocado no cabeçalho do pacote, sendo utilizado no lugar de um endereço, geralmente um endereço IP, com o objetivo do roteador direcionar o tráfego até o seu destino. Essa forma de roteamento apresenta vantagens conforme descrito abaixo:

- **Velocidade, Atraso e Jitter:** É consideravelmente mais rápido que o IP tradicional. Isso resulta em um atraso menor no transporte do tráfego através da rede. Também resulta em um *jitter* menor, uma consideração importante para aplicações que não toleram altos valores desse efeito, como voz e vídeo.
- **Escalabilidade:** Permite que um grande número de endereços IP possa ser associado com um ou alguns rótulos. Essa aproximação reduz o tamanho das tabelas de endereços e permite que o roteador atenda mais usuários.
- **Consumo de Recursos:** Redes LS não necessitam de muitos recursos para executar mecanismos de controle para se estabelecer caminhos comutados em rótulo (LSP – *Label Switching Path*), para o tráfego dos usuários.

- **Controle da Rota:** A maioria das redes baseadas em IP utilizam o conceito de roteamento baseado no destino, onde o endereço IP do seu datagrama determina a rota através da rede.

Nem sempre o roteamento baseado no destino é uma operação eficiente. O MPLS oferece métodos para utilizar técnicas de controle de rota mais eficientes, disponibilizando um alto nível de serviço aos usuários.

- **Engenharia de Tráfego:** Como parte do controle da rota, muitas das operações MPLS são projetadas para permitir, ao provedor de serviço, a construção de enlaces e nós da rede com o objetivo de oferecer diferentes tipos de tráfego, assim como restringir o tráfego para portas específicas da rede. Essa idéia é importante em otimizar recursos da rede.

- **Rótulos e Lâmbdas:** Se LS é utilizada em redes ópticas, é possível mapear um rótulo ou mais, para os comprimentos de onda. Desse modo, utiliza-se um comutador fotônico O/O/O (PXC – *Photonic Crossconnect*), reduzindo-se o atraso e o *jitter* no processamento do *payload* do usuário [5] [25].

7.3.1. CLASSE DE EQUIVALÊNCIA DE TRANSMISSÃO

A classe de equivalência de transmissão (FEC – *Forward Equivalence Class*) é aplicada nas operações LS e é utilizada para descrever uma associação de pacotes com um endereço destino, ou seja, um subconjunto de pacotes que são interpretados da mesma maneira pelo roteador. No roteamento tradicional, um pacote é atribuído a uma FEC em cada salto, em MPLS isso é realizado somente uma vez, ou seja, quando o pacote ingressa na rede. Implementações FEC podem também associar um valor com um endereço destino e uma classe de tráfego.

Primeiramente, a FEC vem sendo utilizada porque permite o agrupamento de pacotes em classes. Desse agrupamento, seu valor em um pacote pode ser utilizado para configurar prioridades para a manipulação dos pacotes, fornecendo uma prioridade maior para certas FECs. Por outro lado, ela também pode ser utilizada para fornecer operações eficientes de qualidade de serviço (QoS - *Quality of Service*) [11].

7.3.2. TIPOS DE NÓS MPLS

Uma rede MPLS é basicamente realizada com os componentes ilustrados na Figura 7.2.

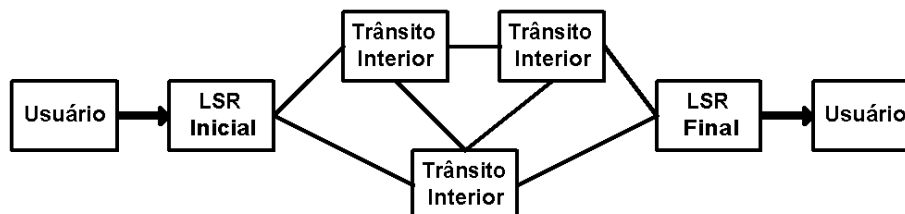


Figura 7.2 – Estrutura de uma rede MPLS

- **Roteador de Comutação de Rótulo (LSR – Label Switching Router) Inicial (Ingress LSR):** Recebe o tráfego do usuário no modo original e classifica-o em uma FEC, gerando um cabeçalho MPLS e atribuindo a ele um rótulo inicial. O datagrama IP é encapsulado no pacote MPLS, sendo este acoplado ao datagrama. Se for atribuído uma operação de QoS, o LSR inicial condicionará o tráfego em concordância com as regras pré-estabelecidas.
- **Trânsito Interior (LSR Central):** Recebe o pacote e utiliza o cabeçalho MPLS para fazer decisões de transmissão. Também executa troca de rótulo e não se preocupa com o processamento do cabeçalho IP, somente com o do rótulo.
- **LSR Final (Egress LSR):** Executa as operações de remoção do cabeçalho MPLS e de entrega do pacote ao usuário final.

Uma diferença significativa entre os LSRs e os roteadores ópticos é que, com os LSRs, a informação transmitida é transportada explicitamente como parte dos rótulos dos pacotes de dados, enquanto, que nos ópticos, a comutação da informação depende do comprimento de onda [11] [13].

7.4. MULTIPROTOCOLO DE COMUTAÇÃO LÂMBDA

A estrutura para interconectar redes ópticas e MPLS é chamada de multiprotocolo de comutação lâmbda (MP λ S – *Multiprotocol Lambda Switching*). Ambas tecnologias possuem mecanismos ou planos de controle para gerenciar o tráfego do usuário. As funções do plano de controle incluem a descoberta de recursos, o controle do roteamento distribuído e o gerenciamento da conexão.

Um aspecto importante da conexão entre MPLS e as redes ópticas é correlacionar um valor de rótulo MPLS com um comprimento de onda óptico. A realização de uma arquitetura IP através de uma rede de transporte óptica baseada em MPLS segue os seguintes procedimentos:

- Utiliza-se protocolos de roteamento IP para descobrir as melhores rotas.
- Com o protocolo MPLS, atribui-se rótulos aos endereços IP das rotas.
- Os rótulos MPLS podem ser mapeados em comprimentos de onda específicos entre nós adjacentes [5] [25].

7.5. MPLS GENERALIZADO

O MPLS generalizado (GMPLS – *Generalized Multiprotocol Label Switching*) foi desenvolvido para fornecer operações MPLS em redes ópticas com a habilidade de utilizar as tecnologias: TDM, comprimentos de onda e comutação óptica.

A estrutura do MPLS admite que os LSRs possuem um protocolo de transmissão capaz de processar e realizar o roteamento de sinais que tenham pacotes, janelas ou células. Os LSRs são assumidos serem dispositivos O/E/O.

Por outro lado, a estrutura do GMPLS assume que os LSRs são dispositivos O/O/O que não distinguem pacotes ou células. Portanto, a decisão de transmissão é baseada em intervalos de tempo, comprimentos de onda ou portas físicas [5] [11] [13] [25].

7.6. WDM EM REDES LAN E DE ACESSO

As arquiteturas LAN de hoje evoluíram bastante em termos de largura de faixa oferecida ao usuário final, com padrões de LAN atuais e emergentes, tais como *Gigabit Ethernet* e *10 Gigabit Ethernet*, utilizando enlaces de fibra óptica com taxas de transmissão elevadas. Como a necessidade para largura de faixa nas LANs aumenta com o surgimento de aplicações de alta velocidade, novas arquiteturas LAN, capazes de fornecer altas taxas de transmissão de uma maneira escalável e de custo efetivo, precisarão ser desenvolvidas.

Além de fornecer maior largura de faixa, essas novas arquiteturas também precisarão fornecer uma maior variedade de serviços ao usuário final. Estes podem incluir multidistribuição, segurança, serviços comutados a pacotes sem conexão, orientados à conexão e baseados em prioridade para diferentes tipos de aplicações. Finalmente, pode ser desejável para as LANs, das futuras gerações, que estas sejam compatíveis com os equipamentos das LANs atuais, de modo a minimizar custos de atualização.

A aplicação local de WDM, mais viável no futuro, encontra-se nas redes de acesso local. Muitas delas, atualmente, possuem natureza de transmissão e podem também conter fibra óptica; portanto, parece natural estender esse empreendimento para incluir redes de transmissão e seleção WDM.

No futuro, pode ser previsto WDM alcançando os limites das casas ou dos escritórios, com usuários compartilhando a largura de faixa de múltiplos comprimentos de onda. Alguns deles podem ser alocados para distribuição de transmissão de sinais de vídeo, enquanto outros podem ser utilizados para dados ou aplicações interativas de alta largura de faixa, tal como vídeo conferência [7].

7.7. COMUTAÇÃO DE PACOTES ÓPTICOS

Redes ópticas que fornecem caminhos ópticos são essencialmente comutadas a circuito. Redes ópticas comutadas a pacote serão capazes de oferecer serviços de circuito virtual ou serviços de datagramas, assemelhando-se ao que é oferecido pelas redes IP e ATM.

Com uma conexão de circuito virtual, a rede oferece o que parece ser uma conexão comutada a circuito entre dois nós. Entretanto, a largura de faixa, oferecida na conexão, pode ser menor do que a disponível em um enlace ou comprimento de onda. Os nós nessas redes, recebem pacotes, lêem seus cabeçalhos, e os comutam para as portas de saída apropriadas. A arquitetura está estruturada de modo que o nó pode também impor um novo cabeçalho ao pacote. Dessa forma reduz-se os atrasos e fornece-se transparência aos dados.

A comutação óptica de pacotes permite habilitar transferências de dados cujas taxas não podem ser contempladas utilizando comutação eletrônica. Essa tecnologia ainda se encontra em pleno desenvolvimento e as pesquisas têm sido intensificadas, embora existam as seguintes dificuldades:

- Falta de memória de acesso aleatório (RAM – *Random Access Memory*) para armazenamento no domínio óptico.
- Estado primitivo da tecnologia óptica em relação aos componentes eletrônicos.
- Exige grande quantidade de *software* e *hardware* complexos, de modo a executar operações de controle e comutação.

Uma arquitetura comutada a pacotes completamente óptica, que no momento mostra-se como promissora para redes de acesso WDM, é baseada no conceito de roteamento de intervalo fotônico. Nesse tipo de roteamento, dados são transmitidos na forma de intervalos fotônicos, os quais apresentam duração fixa e utilizam todos os comprimentos de onda da rede.

Este tipo de arquitetura está estruturado de modo que cada comprimento de onda, no intervalo fotônico, pode conter um único pacote, e todos os pacotes no intervalo fotônico são destinados ao mesmo nó. Portanto, o intervalo fotônico pode ser roteado como uma única unidade integrada sem a necessidade de demultiplexar comprimentos de onda individuais.

Do mesmo modo, desde que o roteamento de intervalos fotônicos não exige componentes sensíveis a comprimentos de onda, a rede óptica assim estruturada apresenta menor complexidade, roteamento mais rápido e um maior grau de escalabilidade [5] [7].

CONCLUSÃO

Este trabalho abordou conceitos fundamentais relacionados com as redes ópticas. Foram apresentadas as atuais configurações (topologias) das redes, as principais características do roteamento de dados, e as atribuições de comprimento de onda visando otimizar o desempenho do sistema. Os critérios de proteção de redes, aqui tratados, foram simulados como ilustração da abordagem teórica descrita ao longo dos capítulos desta dissertação, e foram apresentadas também as tendências tecnológicas nas redes ópticas.

As simulações realizadas, ilustraram os seguintes conceitos: Conversão de comprimento de onda, diferentes formas de roteamento e de proteção, redes estáticas e dinâmicas, e o projeto de redes em anel.

A simulação, considerando a presença de conversão em alguns nós da rede, permitiu a constatação que o índice de bloqueio, dos pedidos dos caminhos ópticos, é reduzido devido a uma maior flexibilidade na atribuição de comprimentos de onda na rede. Isso porque, a viabilização do tráfego de um determinado comprimento de onda na rede está intrinsecamente relacionada com o fato deste já estar sendo utilizado no enlace, e no caso de surgir um pedido de uma nova demanda, este pode ser convertido em outro comprimento de onda disponível na rede [1] [24].

No caso dos diferentes algoritmos utilizados para roteamento de sinais na rede, a análise aqui apresentada concentra-se sob o ponto de vista dos seus resultados, critérios utilizados para efetuá-los e respectivas comparações entre eles.

Em relação aos critérios de proteção disponíveis na plataforma computacional utilizada neste trabalho, foram abordados alguns tópicos fundamentais, cabendo salientar: (a) Como os algoritmos efetuam as opções de proteção; (b) Como é efetuada a mudança nos valores das cargas dos enlaces; (c) Como é aplicado o esquema de Proteção [1+1] na rede; (d) Como é realizado o compartilhamento de carga na presença de falhas em uma rede óptica.

Na simulação de redes estáticas e dinâmicas, foi mencionado o emprego de dois algoritmos atualmente adotados na elaboração de um determinado projeto. Um deles analisa a rede sob o ponto de vista estático e tem caráter de otimização, enquanto o outro assume uma rede estática mas executa o projeto com uma certa folga na carga objetivando atendimento às demandas futuras [2] [4].

No projeto de redes em anel, as simulações ilustraram as respectivas etapas de configuração de cada uma das redes, os resultados obtidos e as diferenças encontradas na fase final do projeto. São feitas considerações sobre as avaliações dos custos disponíveis e efetuadas as devidas comparações, dentro dos recursos da plataforma computacional utilizada neste trabalho.

Atualmente, as redes ópticas apresentam recursos de controle e comutação a nível eletrônico nos nós. Uma tendência é que as redes possam ser estruturadas completamente no domínio óptico, onde a comunicação entre dois pontos quaisquer de uma determinada rede, a comutação ao longo de uma rota e a recepção no seu destino, de um determinado sinal, sejam realizadas exclusivamente sem nenhuma conversão eletrônica. [12] [15] [24].

Nas topologias atuais, encontra-se as hierarquias Sonet/SDH através de sistemas WDM. Uma tendência é que todo o tráfego seja baseado em IP e a partir disso, o roteamento possa ser realizado na camada óptica.

A parte final do trabalho aborda sobre a configuração MPLS e sua fundamental importância nesse processo de evolução das redes. O MPLS utiliza a vantagem do roteamento IP com o esquema de atribuição de rótulos a pacotes segundo a tecnologia ATM, com a intenção de efetuar um roteamento flexível e eficiente na rede [1] [7] [25] [26].

Analisar o tráfego de redes dinâmicas, critérios de otimização, atribuição e roteamento de comprimento de onda nessas redes, bem como elaboração de algoritmos eficientes para realização dessas tarefas são algumas das sugestões para trabalhos futuros no contexto das redes completamente ópticas. O transporte de informações no formato IP sobre enlaces ópticos também representa um tema interessante que pode ser pesquisado. Avaliar estruturas capazes de permitir essas conexões e compreender comutação de pacotes fotônicos corresponde a um tema promissor nos avanços tecnológicos que podem ser obtidos nas redes ópticas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ramaswami R., Sivarajan K., *Optical Networks: A Practical Perspective*, Morgan Kaufmann Publishers, 1ª Ed. 1998.
- [2] *VPI Transport Maker™ User's Manual*, VPI Systems™ 2001.
- [3] Ramaswami R., Sivarajan K., *Optical Networks: A Practical Perspective*, Morgan Kaufmann Publishers, 2ª Ed 2002.
- [4] *VPI Transport Maker™ Applications Manual*, VPI Systems™ 2001.
- [5] Black U., *Optical Networks: Third Generation Transport*, Prentice Hall PTR, 1ª Ed 2002.
- [6] Murthy, C. Siva, Gurusamy M., *WDM Optical Networks: Concepts, Design and Algorithms*, Prentice Hall PTR, 1ª Ed. 2002.
- [7] Goralski W., *Optical Networking & WDM*, McGraw-Hill, 1ª Ed 2001.
- [8] Sivalingam, Krishna M., Subramaniam S., *Optical WDM Networks: Principles and Practice*, Kluwer Academic Publisher, 1ª Ed 2000.
- [9] Stern, Thomas E., Bala K., *Multiwavelength Optical Networks: A Layered Approach*, Prentice Hall PTR, 1ª Ed. 2000.
- [10] Laude, Jean-Pierre, *DWDM: Fundamentals, components, and applications*, Artech House Publishers, 1ª Ed 2002.
- [11] *MPLS – An introduction to multiprotocol label switching*, 55053.25/04 – 01 Issue 2, Abril 2001, Nortel Networks, www.nortelnetworks.com, (19/03/02)
- [12] Bala K., *Evolution to All-Optical Switching*, Tellium Inc., www.iec.org, (23/03/02).
- [13] Semeria C., *Multiprotocol Label Switching: Enhancing Routing in the New Public Network*, Juniper Networks, Part-Number 200001-002 09/27/99, www.iec.org, (22/03/02)
- [14] Green, Paul E., *Fiber Optic Networks*, Prentice-Hall, 1ª Ed 1993.
- [15] Cameron D., *Optical Networking: A Wiley Tech Brief*, Wiley Computer Publishing, 1ª Ed. 2002.
- [16] Tanenbaum, Andrew S., *Redes de Computadores*, Editora Campus Ltda, 3ª Ed 1997.
- [17] *Cisco Network Academy Program*, Cisco Networking Academy Program: First –Year Companion Guide, Cisco Press, 2ª Ed 2001.
- [18] Scott C., Wolfe P. & Erwin M., *Virtual Private Networks*, O'Reilly & Associates, 2ª Ed. 1999.
- [19] Black U., *IP Routing Protocols: RIP, OSPF, BGP, PNNI and Cisco Routing Protocols*, Prentice Hall PTR, 1ª Ed 2000.
- [20] Keiser G., *Optical Fiber Communications*, Mc-Graw Hill, 3ª Ed 2000.

- [21] Bates, Regis J., *Optical Switching and Networking Handbook*, McGraw-Hill, 1ª Ed 2001.
- [22] Kaminow, Ivan P., Koch, Thomas L., *Optical Fiber Telecommunications III A*, Academic Press, 1ª Ed 1997
- [23] Kaminow, Ivan P., Koch, Thomas L., *Optical Fiber Telecommunications III B*, Academic Press, 1ª Ed 1997
- [24] Ramaswami R., Sivarajan, Kumar N., *Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks*, www.google.com.br, (02/06/02)
- [25] MPLS Tutorial, <http://www.nanog.org/mtg-9905/ppt/mpls> (20/04/02)
- [26] Durrezi A., Jain R., Chandhok N., Jagannathan R., Seetharaman S., e Vinodkrishnan K., *IP over All-Optical Networks – Issues*, www.google.com.br, (26/04/02)
- [27] Assis, K. D. R., Waldman H., Calmon, L. C., *Virtual Topology Design for a Hypothetical Optical Network*, (03/05/02)
- [28] Ould-Brahim H., *Optical VPNs*, Nortel Networks, www.nortelnetworks.com, (21/04/02)
- [29] Birman A., Kersenbaum A., *Routing and Wavelength Assignment Methods in Single-Hop All-Optical Networks with Blocking*, www.google.com.br, (04/06/02)
- [30] Birman A., *Computing approximate blocking probabilities for a class of all-optical networks*, www.google.com.br, (07/06/02)
- [31] Gerstel O., Ramaswami R., Sasaki G., *Benefits of Limited Wavelength Conversion in WDM Ring Networks*, www.google.com.br, (10/06/02)
- [32] Raghavan P., Upfal E., *Efficient Routing in All-Optical Networks*, www.google.com.br, (12/06/02)
- [33] Waldman H., Yacoub, Michel Daoud, *Telecomunicações: Princípios e Tendências*, Ed. Érica Ltda, 1ª Ed. 1997.
- [34] Haykin, Simon, *Communication Systems*, John Wiley & Sons, 4ª Ed 2001.
- [35] Lee, Edward A., Messerschmitt, David G., *Digital Communication*, Kluwer Academic Publishers, 2ª Ed 1996.

APÊNDICE I: Programa em MatLab que gera um gráfico do número de acopladores em função dos usuários da rede - Figura 2.3

```
% Programa em Matlab que implementa uma comparação gráfica entre redes  
% estrela e barramento  
clc  
% Variação do número de usuários  
n = 0:0.01:25 ;  
% Cálculo do número de acopladores na rede em barramento  
acb = 2.*n ;  
% Cálculo do número de acopladores na rede em estrela  
ace = (n./2).*(log2(n)) ;  
% Gráfico de comparação das duas redes  
plot(n,acb,n,ace) ; xlabel('n') , ylabel('Número de acopladores') , grid on  
legend('Barramento' , 'Estrela') ;  
axis ([ 0 25 0 60]) ;
```

APÊNDICE II: Programa em MatLab que gera um gráfico de comparação entre os valores de throughput dos protocolos SA/SA básico e modificado - Figura 2.5

```

% Programa em MatLab que ilustra a comparação entre o throughput de
% Redes utilizando o protocolo SA/SA Básico e Modificado, com os seguintes
% dados:
% S = 10 ; Tamanho do intervalo de dados em relação ao de controle.
% W = 16 ; Número de canais ou comprimentos de onda da rede.
% G = n*p ; Número de canais da rede vezes a probabilidade de enviar algum
% pacote de dados com sucesso.
clc ;
t = 'Tamanho do Intervalo de Dados padrão => S = 10' ;
char(t)
S = input('Entre com o valor do Tamanho do Intervalo de Dados: ');
t = 'Número de Canais ou Comprimentos de Onda da rede padrão => W = 16' ;
char(t)
W = input('Entre com o Número de Canais ou Comprimentos de Onda da rede: ');
%Variação do intervalo de G
G = 0:0.001:10 ;
% Cálculo do throughput da rede utilizando o Protocolo SA/SA Básico
Tb = ((S.*G.*exp(-G))./W).*(exp(-G./W)).^(2*(S-1)) ;
% Cálculo do throughput da rede utilizando o Protocolo SA/SA Modificado
Tm = ((S.*G.*exp(-G))./W).*(1-((G.*exp(-G))./W)).^(2*(S-1)) ;
% Gráfico do throughput em função de 'G'
hold off
figure(1) ;
plot(G,Tb,'r',G,Tm,'b') ; title('Análise gráfica do throughput do protocolo SA/SA') ;
xlabel('g'); ylabel('throughput'); grid on ;
legend('SA/SA Básico' , 'SA/SA Modificado') ;
hold off
figure(2) ;

```

```
semilogy(G,Tb,'r',G,Tm,'b') ; title('Análise gráfica do throughput do protocolo SA/SA  
(Gráfico semilog)') ; xlabel('g'); ylabel('throughput'); grid on ;  
legend('SA/SA Básico' , 'SA/SA Modificado') ;
```

APÊNDICE III: Programa em MatLab que gera um gráfico dos valores de throughput do protocolo DT-WDMA - Figura 2.8

% Programa em MatLab que ilustra o throughput do Protocolo DT-WDMA

% N = 16 ; Número de nós, canais ou comprimentos de onda na rede.

% P = 0:0.001:1 ; Probabilidade que um nó tenha um pacote para transmissão.

clc ;

t = 'Número de nós, canais ou comprimentos de onda da rede padrão => N = 16' ;

char(t)

N = input('Entre com o valor do Número de nós da Rede: ');

%Variação do intervalo da probabilidade 'P'

P = 0:0.001:1 ;

% Cálculo do throughput da rede utilizando o Protocolo DT-WDMA

Td = 1 - ((1-P)/(N-1)).^(N-1) ;

% Cálculo do throughput da rede utilizando o Protocolo DT-WDMA,

% considerando um 'N' maior número de usuários

Tdn = 1 - exp(-P) ;

% Gráfico do throughput em função de 'P'

hold off

figure(1) ;

plot(P,Td,'r',P,Tdn,'b') ; title('Análise gráfica do throughput do protocolo DT-WDMA') ; xlabel('p'); ylabel('throughput'); grid on ;

legend('throughput' , 'throughput para um grande número de nós') ;

hold off

figure(2) ;

semilogy(P,Td,'r',P,Tdn,'b') ; title('Análise gráfica do throughput do protocolo DT-WDMA') ; xlabel('p'); ylabel('throughput'); grid on ;

legend('throughput' , 'throughput para um grande número de nós') ;

APÊNDICE IV: Programa em MatLab que realiza uma comparação entre redes estáticas para o caso ideal, Offline e Online - Figura 3.6

```

% Programa em MatLab que compara o projeto de redes estáticas sobre dois
% aspectos ( roteamento Offline e Online ) com o caso ideal
% n = 1:1:1000 ; Número de usuários da rede.

clc ;

t = 'Número de Usuários da rede padrão => N = 0:1:1000' ;
char(t)

N = input('Entre com o valor do Número de Usuários da Rede: ');

% Cálculo do número de canais ou comprimentos de onda para a rede
% Estática Ideal

t = 'Número de Comprimentos de Onda da rede no caso Ideal: ';
char(t)

WidN = sqrt(N/exp(1))

for n=1:1:1000
    Widn(n) = sqrt(n./exp(1)) ;
end

%Variação do intervalo número de usuários 'n'

n = 1:1:1000 ;

% Cálculo do número de canais ou comprimentos de onda para a rede
% Estática com roteamento Offline

Wrfn = 2.*sqrt(n.*(log2(n.*sqrt(2)))) ;

t = 'Número de Comprimentos de Onda da rede no caso offline: ';
char(t)

WrfN = 2*sqrt(N*(log2(N*sqrt(2))))

% Cálculo do número de canais ou comprimentos de onda para a rede
% Estática com roteamento Online

bn = sqrt(n./log2(n)) ;

kn = 32.*log2(n) ;

Wron = bn.*kn ;

t = 'Número de Comprimentos de Onda da rede no caso online: ';

```

```

char(t)
bN = sqrt(N/log2(N)) ;
kN = 32*log2(N) ;
WroN = bN*kN
% Gráfico do número de comprimentos de onda em função do número de
% usuários 'n'
hold off
figure(1) ;
plot(n, Widn, 'm', n, Wrfn, 'r', n, Wron, 'b') ; title('Análise para redes estáticas') ;
xlabel('n'); ylabel('W'); grid on ;
legend('Caso ideal', 'Roteamento Offline', 'Roteamento Online') ;
hold off
figure(2) ;
semilogy(n, Widn, 'm', n, Wrfn, 'r', n, Wron, 'b') ; title('Análise para redes estáticas') ;
xlabel('n'); ylabel('W'); grid on ;
legend('Caso ideal', 'Roteamento Offline', 'Roteamento Online') ;

```

APÊNDICE V: Programa em MatLab que gera um gráfico do número de comprimentos de onda necessários em um roteamento RACO Offline adotando modelo de carga máxima - Figura 3.11

```

% Programa em MatLab que ilustra o RACO Offline em uma rede: Modelo de
% Carga Máxima
% Dado o roteamento de um conjunto de caminhos ópticos com carga 'L' em
% uma rede 'G' com 'M' eixos, com o número máximo de saltos em um
% caminho óptico sendo 'D', o número de comprimentos de onda suficiente
% para satisfazer esse pedido é:
%  $W = \min[(L-1)*D+1, (2L-1)\sqrt{M}-L+2]$ 
% L = 2 ; Carga máxima padrão em um enlace da rede.
% D = 3 ; Número máximo de saltos em um enlace da rede.
% M = 5 ; Número de eixos da rede.
clc ;
t = 'Valor da Carga Máxima da rede padrão => L = 2' ;
char(t)
L = input('Entre com o Valor da Carga Máxima da rede: ')
t = 'Valor do número máximo de saltos em um enlace da rede padrão => D = 3' ;
char(t)
D = input('Entre com o valor do número máximo de saltos em um enlace da rede: ')
t = 'Valor do número de eixos da rede padrão => M = 18' ;
char(t)
M = input('Entre com o Valor do número de conexões da rede: ')
%Variação do intervalo de carga máxima da rede 'l'
l = 0:0.001:20 ;
% Cálculo do número de comprimentos de onda em função de 'L' , 'D' e 'M'
W1 = fix((L-1)*D+1) ;
W2 = fix((2*L-1)*sqrt(M)-L+2) ;
if (W1<=W2)
    W = W1 ;
else
    W = W2 ;

```

```
end
t = 'Valor do número de Comprimentos de onda necessários à rede:' ;
char(t)
W
% Gráfico do número de comprimentos de onda em função de 'l' , 'D' e 'M'
w1 = fix((l-1). *D+1) ;
w2 = fix((2. *l-1). *sqrt(M)-l+2) ;
for k = 1:20001
if (w1(k)<=w2(k))
    w(k) = w1(k) ;
else
    w(k) = w2(k) ;
end
end
hold off
figure(1) ;
plot(l,w,'r') ; title('Análise gráfica do RACO Offline') ; xlabel('L'); ylabel('W'); grid
on ;
legend('Número de comprimentos de onda') ; axis([0 10 0 20]) ;
```

APÊNDICE VI: Programa em MatLab que gera um gráfico do número de comprimentos de onda necessários em uma rede em anel adotando o RACO Offline com modelo de carga máxima - Figura 3.13

```

% Programa em MatLab que ilustra o RACO Offline em uma rede em anel:
% Modelo de Carga Máxima
% Dado um conjunto de pedidos de caminhos ópticos e um roteamento em um
% anel com carga 'L', a atribuição de comprimento de onda (ACO) sem
% conversão pode ser feita com '(2L-1)' comprimentos de onda
% L = 2 ; Carga máxima padrão em um enlace da rede.
clc ;
t = 'Valor da Carga Máxima da rede padrão => L = 2' ;
char(t)
L = input('Entre com o Valor da Carga Máxima da rede: ')
%Variação do intervalo de variação de carga máxima da rede 'l'
l = 0.1:0.001:10 ;
% Cálculo do número de comprimentos de onda em função de 'L'
t = 'Valor do número de Comprimentos de onda necessários à rede:' ;
char(t)
W = 2*L-1
% Gráfico do número de comprimentos de onda em função de 'l'
w = 2.*l - 1 ;
hold off
figure(1) ;
plot(l,w,'r') ; title('Análise gráfica do RACO Offline') ; xlabel('L'); ylabel('W'); grid
on ;
legend('Número de comprimentos de onda') ;
axis([0 10 0 20]) ;

```

APÊNDICE VII: Programa em MatLab que gera um gráfico do número de comprimentos de onda necessários para uma rede em linha adotando RACO Online com modelo de carga máxima – Figura 3.15

```

% Programa em MatLab que ilustra o RACO Online em anéis: Modelo de
% Carga Máxima
% Em uma rede em linha com 'n' nós, todos os pedidos de caminhos ópticos
% online com carga 'L' podem ser atendidos utilizando no máximo
% 'L*max(log2n)' comprimentos de onda sem exigir conversão
% L = 2 ; Carga máxima padrão em um enlace da rede.
% N = 10 ; Número de nós padrão da rede.
clc ;
t = 'Número de nós, canais ou comprimentos de onda da rede padrão => N = 10' ;
char(t)
N = input('Entre com o valor do Número de nós da Rede: ')
t = 'Valor da Carga Máxima da rede: padrão => L = 2' ;
char(t)
L = input('Entre com o Valor da Carga Máxima da rede: ')
%Variação do intervalo do número de nós da rede 'n'
n = 1:0.001:25 ;
% Cálculo do número de comprimentos de onda em função de 'L' e 'N'
W = L*ceil(log2(N))
% Gráfico do número de comprimentos de onda em função de 'L' e 'n'
w = L.*ceil(log2(n)) ;
hold off
figure(1) ;
plot(n,w,'r') ; title('Análise gráfica do RACO Online para uma rede em linha') ;
xlabel('n'); ylabel('W'); grid on ;
legend('Número de comprimentos de onda') ;
axis([0 25 0 35]) ;

```

APÊNDICE VIII: Programa em MatLab que gera um gráfico do número de comprimentos de onda necessários para uma rede em anel adotando RACO Online com modelo de carga máxima - Figura 3.16

```

% Programa em MatLab que ilustra o RACO Online em anéis: Modelo de
% Carga Máxima
% Em uma rede em anel com n nós, todos os pedidos de caminhos ópticos online
% com carga 'L' podem ser atendidos utilizando no máximo
% 'L*max(log2n) + L' comprimentos de onda sem exigir conversão
% L = 2 ; Carga máxima padrão em um enlace da rede.
% N = 10 ; Número de nós padrão da rede.
clc ;
t = 'Número de nós, canais ou comprimentos de onda da rede padrão => N = 10' ;
char(t)
N = input('Entre com o valor do Número de nós da Rede: ')
t = 'Valor da Carga Máxima da rede: padrão => L = 2' ;
char(t)
L = input('Entre com o Valor da Carga Máxima da rede: ')
%Variação do intervalo do número de nós da rede 'n'
n = 1:0.001:25 ;
% Cálculo do número de comprimentos de onda em função de 'L' e 'N'
t = 'Valor do Número de Comprimentos de Onda: ' ;
char(t)
W = L*ceil(log2(N)) + L
% Gráfico do número de comprimentos de onda em função de 'L' e 'n'
w = L.*ceil(log2(n)) + L;
hold off
figure(1) ;
plot(n,w,'r') ; title('Análise gráfica do RACO Online para uma rede em anel') ;
xlabel('n'); ylabel('W'); grid on ;
legend('Número de comprimentos de onda') ;
axis([0 25 0 35]) ;

```

APÊNDICE IX: Programa em MatLab que gera dois gráficos referentes ao número de comprimentos de onda, adotando um RACO Online e modelo de carga máxima, considerando a ausência e a presença de conversão na rede - Figura 3.17 e Figura 3.18

```

% Programa em MatLab que ilustra o RACO Online em uma rede em anel:
% Modelo de Carga Máxima
% Em uma rede em anel com 'n' nós, todos os pedidos de caminhos ópticos
% online permanentes com carga 'L' podem ser atendidos utilizando:
% (a) No máximo '2L' comprimentos de onda sem conversão e
% (b) No máximo 'max(0,L-d) + L' com conversão limitada de grau 'd'
% (a)  $W = 2L$ 
% (b)  $W = \max(0, L-d) + L$ 
% L = 2 ; Carga máxima padrão em um enlace da rede.
% D = 2 ; Grau máximo padrão de conversão da rede.
clc ;
t = 'Valor da Carga Máxima da rede padrão => L = 2' ;
char(t)
L = input('Entre com o Valor da Carga Máxima da rede: ')
t = 'Valor do grau máximo de conversão padrão da rede => D = 2' ;
char(t)
D = input('Entre com o valor do grau máximo de conversão da rede: ')
%Variação do intervalo de carga máxima da rede 'l'
l = 0:0.001:20 ;
%Variação do intervalo do grau máximo da rede 'd'
d = 0:0.001:20 ;
% Cálculo do número de comprimentos de onda em função de 'L' para o caso
% (a)
t = 'Valor do número de Comprimentos de onda necessários à rede:' ;
char(t)
WS = 2*L
% Cálculo do número de comprimentos de onda em função de 'L' e 'D' para o
% caso (b)
t = 'Valor do número de Comprimentos de onda necessários à rede:' ;

```



```

char(t)
WC1 = ceil(L-D) ;
if (WC1<=0)
    WC = L
else
    WC = ceil(L-D) + L
end
% Gráfico do número de comprimentos de onda em função de 'l' para o caso
% (a)
ws = 2.*l ;
hold off
figure(1) ;
plot(l,ws,'r') ; title('Ausência de conversão') ; xlabel('L') ; ylabel('W') ; grid on ;
legend('Número de comprimentos de onda') ;
axis([0 10 0 20]) ;
% Gráfico do número de comprimentos de onda em função de 'l' e 'D' para o
% caso (b)
for k = 1:20001
if ((ceil(l(k) - d)<=0)
    wc1(k) = l(k) ;
else
    wc1(k) = (ceil(l(k) - D)) + l(k);
end
end
hold off
figure(2) ;
plot(l,wc1,'r') ; title('Conversão limitada com variação de carga na rede') ;
xlabel('L') ; ylabel('W') ; grid on ;
legend('Número de comprimentos de onda') ;
axis([0 10 0 20]) ;
% Gráfico do número de comprimentos de onda em função de 'L' e 'd' para o
% caso (b)

```

```
for q = 1:20001
    if ((ceil(L - d(q))) <= 0)
        wc2(q) = L ;
    else
        wc2(q) = (ceil(L - d(q))) + L ;
    end
end
hold off
figure(3) ;
plot(l,wc2,'r') ; title('Conversão limitada com variação do grau de conversão') ;
xlabel('d'); ylabel('W'); grid on ;
legend('Número de comprimentos de onda') ;
axis([0 10 0 20]) ;
```