

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica
Departamento de Telemática
Laboratório de Tecnologia Fotônica

Redes Fotônicas de Comunicação: Análise de Desempenho de Redes de Difusão em Configuração Estrela e Anel

Este exemplar corresponde a redação final da tese
defendida por Ana Paula Sampaio Freitas
e aprovada pela Comissão
Julgada em 06/07/1998
Orientador

Autora: Ana Paula Sampaio de Freitas

Orientador: Prof. Dr. Edson Moschim

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade
Estadual de Campinas - FEEC - UNICAMP, como parte dos requisitos
exigidos para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA.

Julho - 1998



8220268

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	F. 11/11/98
V. Ex.	F. 11/11/98
TÍTULO BC/	35505
PREÇO	395,98
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	22/10/98
N.º QPD	

CM-00117600-3

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

F884r Freitas, Ana Paula Sampaio de
Redes fotônicas de comunicação: análise de desempenho de redes de difusão em configuração estrela e anel. / Ana Paula Sampaio de Freitas.--Campinas, SP: [s.n.], 1998.

Orientador: Edson Moschim.

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

1. Comunicações óticas. 2. Redes locais de computação. 3. Redes de computação - Protocolos. I. Moschim, Edson. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

*A Deus, a meus pais Christovam e
Fátima e ao meu namorado Juliano*

Agradecimentos

A Deus.

Ao Prof. Edson Moschim, pela sua orientação.

A Juliano Pável Brasil Custódio, pelas sugestões e ajuda.

Aos pesquisadores Jorge Salomão Pereira, José Tadeu de Jesus, Daniel Moutinho Pataca, Mônica de Lacerda Rocha e ao Prof. Hélio Waldman pela ajuda e incentivo.

Aos amigos Eric, Kakimoto, Marcelo, Marina, Mário, Sandro e demais amigos do DT, DECOM, DMO, DENNIS e DCA pela amizade e companheirismo.

À CAPES, pela bolsa de estudos, sem a qual não seria possível a realização deste trabalho.

Àqueles que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Sumário

Dentre as técnicas de acesso múltiplo utilizadas nos sistemas de comunicações ópticas, a técnica de acesso múltiplo por divisão de comprimento de onda (WDMA) é a que mais se destaca devido a possibilidade de explorar toda a largura de banda disponível das fibras ópticas monomodo, na região de baixas perdas. Esta técnica também pode ser utilizada em conjunto com outras técnicas como TDMA, CDMA e SCMA para formar sistemas híbridos e melhorar a capacidade máxima da rede. Neste trabalho, são apresentadas algumas topologias físicas e uma comparação do desempenho de cada uma delas em pontos críticos de projeto, tais como: balanço de potência, atraso médio de propagação e quantidade de fibra utilizada na rede. Dois protocolos de acesso ao meio, nos dois tipos de topologia mais utilizados em redes ópticas, foram simulados e analisados. Os protocolos estudados foram escolhidos de modo a maximizar a vazão e minimizar o atraso médio de propagação da rede.

Abstract

Among the multiaccess technologies used in optical communications systems, the wavelength division multiaccess (WDMA) is the one that stands out because of the possibility of exploring all the available bandwidth in the low-loss region of single-mode optical fibers. This kind of technology can be also used with other technologies like TDMA, CDMA e SCMA to form hybrid systems and improve the maximum network capacity. In this work, we presented some physical topologies and a comparison of the performance of each of them in critical project aspects, such as: power budget, average propagation delay and amount of fiber required in the network. Two medium access protocols, for two kinds of topologies most used in optical networks, were simulated and analyzed. The studied protocols were selected to maximize the throughput and to minimize the average propagation delay of the network.

Índice

Lista de Figuras	vi
Lista de Símbolos	ix
Lista de Acrônimos	xi
Introdução	1
Capítulo 1 Redes de Comunicação WDM	3
1.1 Conceitos Básicos	3
1.1.1 Redes de Difusão	3
1.1.2 Redes com Roteamento de Comprimento de Onda	4
1.1.3 Reuso de Comprimento de Onda	5
1.1.4 Translação de comprimento de onda	6
1.1.5 Comutação Óptica	6
1.2 Características das Redes WDM	7
1.2.1 Quantidade de Fibra e de Acopladores utilizados na Rede	7
1.2.2 Balanço de Potência	11
1.2.3 Atraso médio de propagação na fibra	13
1.3 Redes Híbridas	15
1.3.1 WDM/SCMA	15
1.3.2 WDM/CDMA	15
1.3.3 WDM/TDMA	16
Referências Bibliográficas	17
Capítulo 2 Redes WDM na Topologia Estrela	19
2.1 Estrela de Um Salto	20
2.2 Estrela de Vários Saltos	25
2.3 Protocolo de Acesso ao Meio	27
2.3.1 Descrição do Protocolo	28
2.3.2 Análise Teórica	31
2.3.3 Simulação	33
Referências Bibliográficas	37
Capítulo 3 Redes WDM na Topologia Anel	38
3.1 Anel de Uma Fibra	39
3.2 Anel de Várias Fibras	45

3.3 Protocolo de Acesso ao Meio	49
3.3.1 Descrição do Protocolo	50
3.3.2 Simulação	52
Referências Bibliográficas	55
Conclusão	56
Apêndice A Cálculos de Atenuação	58
Apêndice B Cálculos de Atraso	63
Apêndice C Equações de Balanço Local	69
Apêndice D Dispositivos Ópticos Sintonizáveis	73
Apêndice E Modelo OSI/ISO	80
Apêndice F Programa de Simulação da Rede Estrela	85
Apêndice G Programa de Simulação da Rede Anel	98

Lista de Figuras

Capítulo 1	Redes de Comunicação WDM	
1.1	Tipos de Conexão Cruzada	5
1.2	Conversor de comprimento de onda	6
1.3	<i>Layout</i> da topologia estrela	8
1.4	Redes nas topologias anel simples e anel duplo	9
1.5	Redes nas topologias barramento dobrado e barramento duplo	10
1.6	Quantidade de fibra utilizada na rede em função do número de nós	10
1.7	Disponibilidade de potência óptica em função do número de nós	12
1.8	Atraso médio de propagação em função do número de nós	14
1.9	Diagrama em blocos do sistema de comutação óptica ATMOS	16
Capítulo 2	Redes WDMA na Topologia Estrela	
2.1	Rede WDMA de um salto na topologia estrela	20
2.2	Diagrama de transição de estado para transmissores ou receptores sintonizáveis	21
2.3	Diagrama de transição de estado para transmissores e receptores sintonizáveis	22
2.4	Número médio de comprimentos de onda utilizados em função da carga média oferecida por nó	23
2.5	Limite da capacidade da rede devido a capacidade limitada do canal de controle	24
2.6	Rede WDMA de vários saltos na topologia estrela	25
2.7	Gráfico do padrão de conectividade <i>Shufflenet</i> para rede com oito nós	26
2.8	Vazão por nó versus número de nós, para redes WDMA de vários saltos <i>Shufflenet</i>	27
2.9	Formato dos <i>mini-slots</i> de <i>status</i> do canal de controle	29
2.10	Vazão máxima alcançada, em função do número de nós, para uma rede na topologia estrela	33
2.11	Vazão por estação por <i>slot</i> versus carga oferecida por estação por <i>slot</i> , para uma rede na topologia estrela	34

2.12	Atraso médio por estação versus vazão por estação por <i>slot</i> , para uma rede na topologia estrela	35
Capítulo 3 Redes WDMA na Topologia Anel		
3.1	Rede WDMA na configuração anel de uma fibra, utilizando PIATOF's	40
3.2	Dispositivo PIATOF como um elemento ADD-DROP	41
3.3	Rede WDMA na configuração anel de uma fibra, utilizando PIATOF's e acopladores passivos	43
3.4	Capacidade da rede em função do número de nós, em uma rede na configuração anel de uma fibra, para diferentes valores de perda por inserção do PIATOF	44
3.5	Rede WDMA na configuração anel de várias fibras, utilizando PIATOF's e acopladores passivos	45
3.6	Capacidade da rede em função do número de nós, em uma rede na configuração anel de várias fibras	47
3.7	Capacidade da rede em função do número de nós, em uma rede na configuração anel de várias fibras	48
3.8	Número mínimo de anéis necessários em função do número de nós	48
3.9	Representação de um nó da rede, com a informação sendo retirada do anel pelo nó destino	50
3.10	Representação de um nó da rede, com a informação sendo retirada do anel pelo nó transmissor	50
3.11	Vazão por estação por <i>slot</i> versus carga oferecida, para uma rede na topologia anel, com a informação retirada do anel após uma volta completa	53
3.12	Vazão por estação por <i>slot</i> versus carga oferecida, para uma rede na topologia anel, com a informação retirada do anel pela estação destino	53
3.13	Vazão por estação por <i>slot</i> versus atraso médio por estação, para uma rede na topologia anel	54
Apêndice B Dispositivos Ópticos Sintonizáveis		
B.1	Atrasos de propagação para a rede anel simples	63
B.2	Atrasos de propagação para a rede anel duplo	64
B.3	Atrasos de propagação para a rede barramento dobrado com pacotes	

	não podendo ser recebidos no barramento de transmissão	66
B.4	Atrasos de propagação para a rede barramento dobrado com pacotes podendo ser recebidos no barramento de transmissão	67
B.5	Atrasos de propagação para a rede barramento duplo	68
Apêndice D	Dispositivos Ópticos Sintonizáveis	
D.1	Esquema de um laser sintonizável DFB com duas seções	74
D.2	Esquema de um laser sintonizável DBR de 3 seções	75
D.3	Esquema de um filtro acusto-óptico	77
Apêndice E	Modelo OSI/ISO	
E.1	Camadas do Modelo OSI	81

Lista de Símbolos

A	Disponibilidade de potência óptica a ser perdida nas conexões da rede (dB)
b	Latência do acoplador de acesso à rede (bits)
bs	Tamanho do <i>mini-slot</i> (bits)
bd	Tamanho do pacote de dados (bits)
B	Taxa de transmissão por estação (Gbps)
c	Velocidade da luz no vácuo ($3 \cdot 10^8$ m/s)
C	Capacidade da Rede (Gbps)
C_c	Capacidade do canal de controle (Gbps)
d_i	Distância de cada estação ao hub, no protocolo DT-WDMA
D	Atraso médio de transmissão da rede
e	Constante exponencial ($e = 2.71828$)
f_n	Frequência de seleção do filtro acusto-óptico sintonizável
F	Gasto médio de fibra da rede (m)
h	Número médio de saltos em uma rede de vários saltos
h	Constante de Planck ($6.626 \cdot 10^{-34}$ J.s)
k	Número de colunas do gráfico de conectividade <i>shufflenet</i>
l	Distância média entre nós (m)
L	Comprimento da fibra (km)
m	Número de anéis da rede
M	Margem de segurança do sistema (dB)
n_p	Número de fótons por bit requeridos no receptor
N	Número de nós
p	Número de transceptores por nó em uma rede <i>shufflenet</i>
P_n	Potência retirada da fibra para a rede na configuração anel
P_T	Potência óptica média do transmissor (dBm)
P_R	Potência óptica mínima requerida no receptor
q_i	Tamanho do buffer de cada estação (em <i>slots</i>)
s_j	Frequência de sub-portadora do nó j, no protocolo PIPELINE
S	Sensibilidade do receptor (dBm)
$t_{\text{_sint}}$	Tempo de sintonia do filtro sintonizável (em segundos)
$T_{\text{ocupação}}$	Tempo de ocupação da conexão (ns)
W	Número de comprimentos de onda disponíveis na rede

α	Atenuação do sinal na fibra (dB/km)
α_t	Coefficiente de acoplamento do <i>tap</i>
α_n	Fração de potência acessada por um nó, da potência transmitida por um nó “n” posições antes dele
β_t	Excesso de perda do <i>tap</i>
β_f	Perda de inserção do filtro acusto-óptico
γ	Vazão da rede por <i>slot</i>
γ_e	Vazão por estação por <i>slot</i>
Λ	Taxa média de geração de pacotes
λ_j	Comprimento de onda do nó j
λ_c	Comprimento de onda de controle
$1/\mu$	Taxa média de atendimento de pacotes
ν	Frequência da portadora óptica (em Hz) dada por c/λ
ρ	Carga média oferecida por estação
τ	Atraso médio entre nós adjacentes na rede
$\bar{\tau}$	Atraso médio entre nós na rede
ω	Número de comprimentos de onda ocupados na rede
$\bar{\omega}$	Número médio de comprimentos de onda ocupados na rede

Lista de Acrônimos

AOTF	Acousto-Optic Tunable Filter – Filtro Sintonizável Acusto-óptico
ASK	Amplitude Shift Keying – Chaveamento de Amplitude
ATM	Asynchronous Transfer Mode – Modo de Transferência Assíncrono
ATMOS	Asynchronous Transfer Mode Optical Switching – Comutação Óptica ATM
BER	Bit Error Rate – Taxa de Erro de Bit
B-ISDN	Broadband Integrated Services Digital Network – Rede Digital de Serviços Integrados Banda Larga
CDM	Code Division Multiplexing – Multiplexagem por Divisão de Código
CDMA	Code Division Multiaccess – Acesso Múltiplo por Divisão de Código
DBR	Distributed Bragg Reflector – Refletor de Grade Distribuída
DFB	Distributed Feedback – Realimentação Distribuída
DQDB	Distributed Queue Dual Bus – Barramento Duplo com Fila Distribuída
DT-WDMA	Dynamic Time Wavelength Division Multiaccess – Acesso Múltiplo por Divisão de Comprimento de Onda com Alocação Dinâmica no Tempo
DUB	Dual Unidirectional Bus – Barramento Unidirecional Duplo
EOTF	Electro-Optic Tunable Filter – Filtro Sintonizável Eletro-óptico
FDDI	Fiber Distributed Data Interface – Interface de Dados Distribuída a Fibra
FDM	Frequency Division Multiplexing – Multiplexagem por Divisão de Frequência
FIFO	First In First Out – O Primeiro a Chegar é o Primeiro a Sair
FITL	Fiber In The Loop – Fibra no Enlace
FOX	Fast Optical Crossconnect – Conexão Cruzada Óptica Rápida
FP	Fabry-Perot
FPF	Fabry-Perot Filter – Filtro Fabry-Perot
FSK	Frequency Shift Keying – Chaveamento de Frequência
FTTH	Fiber To The Home – Fibra até a Casa
FT-TR	Fixed Transmitter, Tunable Receiver – Transmissor Fixo, Receptor Sintonizável
FUB	Folded Unidirectional Bus – Barramento Unidirecional Dobrado
HYPASS	Hybrid Packet Switching System – Sistema de Comutação de Pacote Híbrido
ISO	International Standards Organization – Organização Internacional de Padrões
ITU-T	International Telecommunications Union – União Internacional de Telecomunicações

LAN	Local Area Network – Rede Local
MAGIC	Multistriple Array Grating Integrated Cavity – Cavidade integrada com grade de difração e matriz de múltiplas fitas
MAN	Metropolitan Area Network – Rede Metropolitana
MQW	Multiple Quantum Well – Poço Quântico Múltiplo
MSS	Multiple Subcarrier Signaling – Sinalização com Múltiplas Subportadoras
MZF	Mach-Zender Filter – Filtro Mach-Zender
NIU	Network Interface Unit – Unidade de Interface de Rede
NRZ	Non Return to Zero – Não Retorno a Zero
OSI	Open Systems Interconnection – Interconexão de Sistemas Abertos
PIATOF	Polarization Independent Acoustically Tunable Optical Filter – Filtro Óptico com Sintonia Acústica Independente de Polarização
PSK	Phase Shift Keying – Chaveamento de Fase
RF	Radio Frequency – Frequência de Rádio
RZ	Return to Zero – Retorno a Zero
SBS	Stimulated Brillouin Scattering – Espalhamento Estimulado de Brillouin
SCM	Subcarrier Multiplexing – Multiplexagem por Subportadora
SCMA	Subcarrier Division Multiaccess – Acesso Múltiplo por Subportadora
SDH	Synchronous Digital Hierarchy – Hierarquia Digital Síncrona
TDM	Time Division Multiplexing – Multiplexagem por Divisão do Tempo
TDMA	Time Division Multiaccess – Acesso Múltiplo por Divisão do Tempo
TE	Transversal Electric – Modo de Propagação Transversal Elétrico
TM	Transversal Magnetic – Modo de Propagação Transversal Magnético
TT-FR	Tunable Transmitter, Fixed Receiver – Transmissor Sintonizável, Receptor Fixo
TT-TR	Tunable Transmitter, Tunable Receiver – Transmissor Sintonizável, Receptor Sintonizável
VCSEL	Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser – Laser Emissor de Superfície com Cavidade Vertical
WAN	Wide Area Network – Rede de Longa Distância
WDM	Wavelength Division Multiplexing – Multiplexagem por Divisão de Comprimento de Onda
WDMA	Wavelength Division Multiaccess – Acesso Múltiplo por Divisão de Comprimento de Onda

Introdução

Nos anos 70, os sistemas ópticos eram utilizados somente para aumentar a capacidade dos sistemas de transmissão ponto-a-ponto a longa distância, formando os chamados entroncamentos ópticos. Posteriormente a fibra óptica foi substituindo enlaces em redes locais e metropolitanas, para resolver problemas de congestionamento de rotas. Em seguida, a fibra passou a fazer parte das topologias de LAN's e MAN's já existentes formando redes de segunda geração, como FDDI e DQDB. Hoje, os esforços estão sendo voltados para as redes de terceira geração, ou redes totalmente ópticas, onde a eletrônica é utilizada somente nos pontos finais das conexões. A evolução da óptica encaminha para ter-se, num futuro próximo, a fibra óptica disponível na casa do usuário (sistemas FTTH), podendo oferecer serviços integrados como: dados, voz e vídeo na mesma fibra. À medida que novos serviços se disponibilizam para o usuário, tem-se uma crescente preocupação com o aumento da capacidade suportada pela rede. Com a imensa largura de banda óptica disponível entre as janelas de 1.3 e 1.6 nm (em torno de 40 THz), as redes ópticas tem se mostrado uma solução para o fornecimento de serviços integrados ao usuário. As técnicas de acesso múltiplo surgiram visando o aumento da capacidade da rede. A técnica WDMA é a que melhor explora a largura de banda disponível da fibra óptica. Contudo, as demais técnicas têm sido utilizadas em conjunto com a técnica WDMA formando sistemas híbridos, como WDMA/TDMA, WDMA/CDMA e WDMA/SCMA que aproveitam as vantagens de cada tecnologia. Por exemplo, a técnica SCMA é atrativa pelo domínio da tecnologia de microondas, além dos dispositivos com baixo custo disponíveis no mercado. A técnica CDMA tem a vantagem de possuir maior segurança e privacidade dos dados. E a técnica TDMA é atraente quando se trata de minimizar custos, por isto tem sido visada juntamente com a técnica WDMA para fornecer B-ISDN em sistemas públicos FITL ou FTTH.

Neste trabalho, foi feita uma análise das redes de comunicação WDMA. Para isto, no capítulo 1, foram estudadas algumas topologias existentes, tais como: estrela, anel, anel duplo, barramento dobrado e barramento duplo. Foi analisada a quantidade de fibra e de acopladores utilizados em cada tecnologia, o atraso médio de propagação entre dois nós quaisquer na rede e o balanço de potência para cada uma das topologias, fazendo-se uma comparação entre elas.

Nos capítulos seguintes foi dada ênfase às duas topologias mais implementadas em redes ópticas: estrela e anel. Além dos principais fatores que limitam a capacidade máxima da rede para cada uma das duas topologias, são analisados, também, protocolos de acesso ao meio. Os protocolos de acesso ao meio foram escolhidos visando alcançar valores altos de vazão, mantendo o atraso médio de propagação em valores baixos. Para o caso da rede na configuração estrela, foi simulado o protocolo de acesso ao meio DT-WDMA que se utiliza da técnica WDMA para o transporte dos dados e da técnica TDMA para o transporte da informação de controle. Para o caso da rede na configuração anel, foi estudado o protocolo de acesso ao meio PIPELINE, que utiliza a técnica WDMA para a transmissão de dados e sub-portadoras de RF para a troca da informação de controle entre os nós. No último capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho.

Capítulo 1

Redes de Comunicação WDM

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos básicos sobre redes com multiplexação por comprimento de onda (WDM) e algumas características das topologias físicas, tais como: quantidade de fibra e de acopladores utilizados na rede, balanço de potência e atraso de propagação. Alguns exemplos de redes de acesso híbrido são comentados no final do capítulo.

1.1 Conceitos Básicos

1.1.1 Redes de Difusão (ou Redes de Distribuição)

Neste tipo de rede, o sinal gerado por cada usuário é enviado para todos os nós da rede. Redes WDMA de difusão podem ter seus nós equipados de 3 maneiras [1][2]: transmissores sintonizáveis e receptores fixos (TT-FR: tunable transmitter, fixed receiver), transmissores fixos e receptores sintonizáveis (FT-TR: fixed transmitter, tunable receiver), ou ambos, transmissores e receptores sintonizáveis (TT-TR: tunable transmitter, tunable receiver).

Em redes TT-FR, uma conexão é estabelecida sintonizando o transmissor no comprimento de onda do receptor destino. Colisões podem ocorrer se dois ou mais pacotes enviados por diferentes nós chegam simultaneamente no mesmo destino. Isto pode ser resolvido por meio de um protocolo de acesso adequado. Este tipo de rede é restrito a conexões ponto-a-ponto. Conexões de vários nós transmissores para um nó receptor é possível se os nós da rede forem equipados com mais de um receptor fixo (redes TT-FR^m). Conexões de multidistribuição também são possíveis equipando os nós com mais de um transmissor sintonizável (redes TT^m-FR).

Redes FT-TR são atrativas porque provêm tanto conexões ponto-a-ponto como conexões de multidistribuição, com apenas um transmissor e um receptor em cada nó. A conexão de multidistribuição é estabelecida sintonizando-se mais de um receptor no mesmo comprimento de

onda, ao mesmo tempo. Conexões de vários nós transmissores para um nó receptor também são possíveis se os nós da rede forem equipados com mais de um receptor sintonizável (redes FT-TR^m). Nesta rede não há colisões, uma vez que cada transmissor utiliza um comprimento de onda diferente.

Redes TT-TR podem suportar bem conexões ponto-a-ponto, tráfego de vários nós para um e conexões de multidistribuição, sendo portanto a rede mais flexível. Entretanto protocolos de rede mais complexos são requeridos uma vez que transmissores e receptores devem ser controlados para coordenar os dados dentro da rede.

Se o número de nós na rede é menor ou igual ao número de canais de comprimento de onda disponíveis, então uma rede completamente conectada pode ser conseguida. Uma das principais atrações de redes WDMA de difusão é a transparência a sinais de diferentes formatos de modulação. O formato do sinal é determinado somente pelos equipamentos de transmissão e recepção dos vários nós. Com isso, diferentes velocidades de transmissão e formatos podem existir simultaneamente na mesma rede.

1.1.2 Redes com Roteamento de Comprimento de Onda

Em redes com roteamento de comprimento de onda, o próprio comprimento de onda define o endereço do pacote. Em alguns casos, além do comprimento de onda, a porta de entrada do sinal também define o caminho que o pacote irá seguir. Uma vantagem das redes com roteamento de comprimento de onda sobre as redes de difusão é que elas evitam perda por divisão de potência. A desvantagem deste tipo de rede é que, quando elementos roteadores passivos são utilizados, cada nó deve possuir transmissores e receptores sintonizáveis para alcançar o acesso múltiplo. Entretanto, redes com roteamento de comprimento de onda possibilitam a mudança da estrutura de roteamento interna de acordo com os padrões de tráfego da rede. Isto é atrativo para o caso de tráfego não balanceado. Como cada sinal é restrito a um caminho particular, é possível ter cada comprimento de onda reutilizado várias vezes em diferentes caminhos da rede.

O roteamento de comprimento de onda [2] é alcançado pela implementação de elementos seletivos de comprimento de onda nos nós da rede. O roteamento de comprimento de onda fixo utiliza geralmente multiplexadores WDM na configuração costa-a-costa para permitir troca de comprimentos de onda entre fibras de entrada e de saída num arranjo pré-estabelecido (Figura 1.1a). Esta configuração é chamada de conexão cruzada WDM [3].

O rearranjo pode ser conseguido pela adição de comutadores com divisão espacial (Figura 1.1b). Utilizando conexões cruzadas WDM, cada comprimento de onda em qualquer fibra de entrada pode ser interconectado a qualquer fibra de saída, desde que esta não esteja utilizando aquele comprimento de onda.

As conexões cruzadas a e b da Figura 1.1 podem ser denominadas conexões cruzadas com comprimento de onda seletivo, porque elas selecionam os comprimentos de onda e os rearrajam no domínio espacial. Um terceiro tipo de conexão cruzada é mostrado na Figura 1.1c. A conexão cruzada com troca de comprimento de onda permite qualquer comprimento de onda, em qualquer fibra de entrada, ser conectada com qualquer comprimento de onda de saída, em qualquer fibra de saída.

O comutador de conexão cruzada WDM permite que a rede óptica seja reconfigurada para otimizar o congestionamento de tráfego e o crescimento da rede.

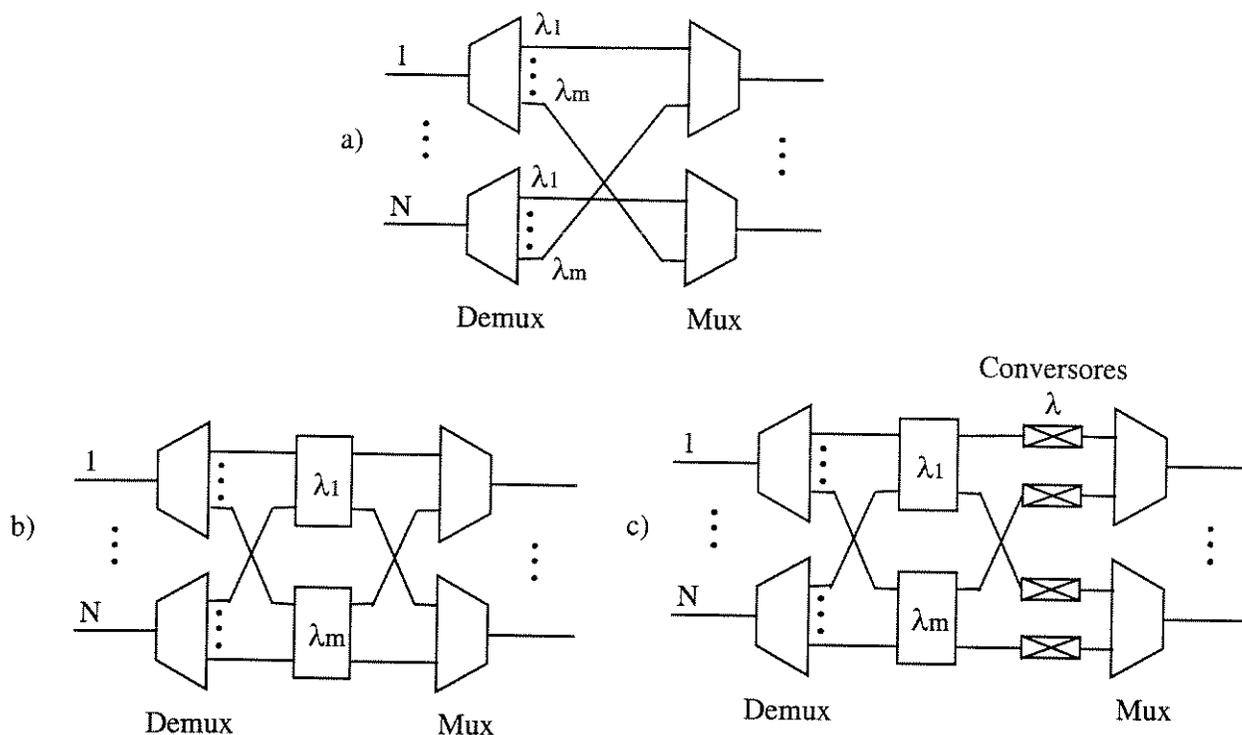


Figura 1.1 - a) Conexão-cruzada WDM fixa com N portas de entrada, N de saída e M comprimentos de onda, b) Conexão-cruzada WDM rearranjável utilizando comutadores com divisão espacial, c) Conexão-cruzada com troca de comprimento de onda utilizando conversores de comprimento de onda, com saída de comprimento de onda fixo e entradas variáveis.

1.1.3 Reuso de Comprimento de Onda

Em redes de difusão, quando um comprimento de onda está sendo utilizado para comunicação entre um par de nós, este mesmo comprimento de onda não pode ser utilizado entre quaisquer outros nós para evitar interferência. O reuso de comprimento de onda através do uso de

roteamento de comprimento de onda foi introduzido para contornar este problema e aumentar a escalabilidade da rede [3].

Um exemplo de reuso de comprimento de onda é a exploração da atenuação provocada por acopladores passivos em redes na topologia anel simples [5]. Neste exemplo, o sinal, após passar por vários acopladores, possui uma potência tal que seu valor é suficiente para ser detectado no receptor destino, mas baixo o suficiente para que o mesmo comprimento de onda deste sinal seja reutilizado em porções diferentes da rede (reuso espacial) sem interferência prejudicial, aumentando a capacidade da rede.

1.1.4 Translação de comprimento de onda

Na translação (ou conversão) de comprimento de onda, a informação em uma portadora óptica em um determinado comprimento de onda é transferida para uma outra portadora com comprimento de onda diferente. Isto pode ser realizado detectando-se a informação do sinal de entrada e utilizando-se o sinal detectado para modular um laser no comprimento de onda de saída desejado. Utilizando-se um laser sintonizável, é possível comutar a informação de entrada para qualquer comprimento de onda de saída. Esta técnica tem sido utilizada em comutadores ópticos, sendo muito útil principalmente em redes de grande extensão (WAN's) [2, 3].

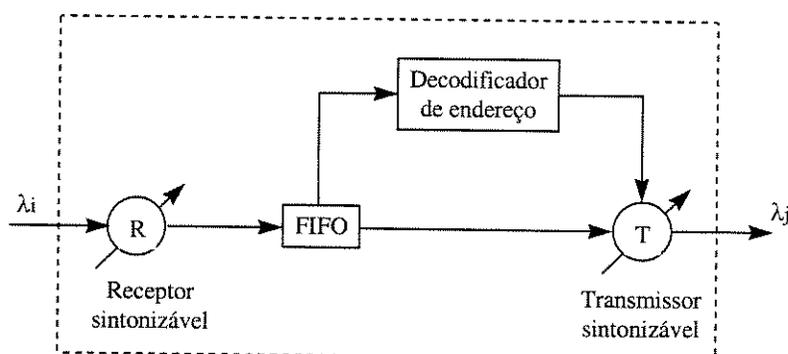


Figura 1.2 - Conversor de comprimento de onda utilizando receptor sintonizável e transmissor sintonizável.

1.1.5 Comutação Óptica

A comutação óptica é utilizada para criar rotas alternativas para os sinais que trafegam na rede. Existem dois tipos de comutação óptica [1, 2]: uma que utiliza comutação espacial seletiva de comprimento de onda, e outra que utiliza a conversão de comprimento de onda. O primeiro tipo de comutação seleciona um conjunto arbitrário de comprimentos de onda em uma fibra, e os redireciona para outra fibra. Esta seleção deve ser rearranjável, tal que o conjunto de comprimentos de onda possa ser mudado quando desejado. A comutação dos comprimentos de

onda deve ser rápida o suficiente para a aplicação necessária. Um dispositivo que pode ser utilizado na comutação espacial é o filtro óptico com sintonia acústica [4].

1.2 Características das Redes WDMA

Deve ser esclarecido primeiramente a diferença entre *lay-out*, topologia física e topologia virtual. O *lay-out* da rede é a disposição física dos nós numa determinada área. Entende-se por topologia física a disposição dos enlaces entre os nós. O modo como a informação trafega entre os nós define a topologia virtual. As análises de quantidade de acopladores e de fibra, balanço de potência e atraso médio de propagação na fibra, feitas a seguir, são baseadas na topologia física.

1.2.1 Quantidade de Fibra e de Acopladores utilizados na Rede

Ao se implementar uma rede, a análise de custo é de grande importância, principalmente no caso de redes públicas. Uma análise da quantidade de fibra e de acopladores utilizados na rede é feita para as topologias estrela, anel e barramento, comparando-se os resultados.

A topologia estrela é a que utiliza o menor número de acopladores. Entretanto, requer a maior quantidade de fibra. Em redes como *Lambdanet* [13] e *Star-track* [2], utiliza-se somente um acoplador estrela $N \times N$. Em redes como *FOX* [15] ou *HYPASS* [14], são utilizados 2 acopladores estrela. Acopladores estrela passivos podem ser construídos utilizando-se acopladores direcionais 2×2 . Neste caso, são necessários $\frac{N}{2} \cdot \log_2 N$ acopladores de 3dB para formar um acoplador estrela $N \times N$, com uma fração de $1/N$ da potência de cada porta de entrada disponível em cada uma das portas de saída [20]. A utilização de acopladores de 3 dB em cascata afeta a modularidade da rede, uma vez que N é um múltiplo de 2 ($N = 2^n$, com $n = 1, 2, \dots$). Uma outra possibilidade é a formação de acopladores estrela utilizando-se a tecnologia de óptica integrada [16]. Estas tecnologias apresentam acoplamento independente do comprimento de onda [17], podendo-se formar acopladores estrela acromáticos ou banda-larga, que atuam bem tanto na janela de 1.3 quanto na janela de 1.55 μm . Para a redução da quantidade de fibra utilizada na rede estrela, foram propostos acopladores estrela reflexivos [18] [19]. Estes acopladores, que podem também ser formados por acopladores de 3 dB, dividem igualmente e refletem a potência de entrada de qualquer uma das N portas, para todas as portas.

Para analisar a quantidade de fibra utilizada na rede estrela supõe-se que os nós da rede estão dispostos uniformemente em uma área quadrada de lado $2a$, centrada no acoplador estrela, como mostra a Figura 1.3. Cada nó está ligado ao acoplador estrela por um par de fibras ópticas, representado por uma linha na Figura 1.3.

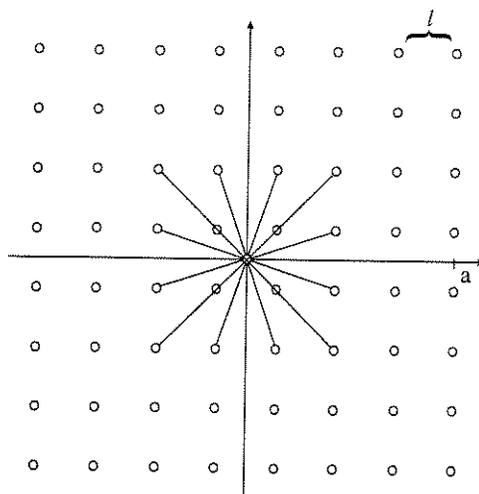


Figura 1.3 – *Lay-out* da topologia estrela. Os nós estão distribuídos uniformemente numa área quadrada de lado $2a$. Os nós estão espaçados por uma distância l (na horizontal ou na vertical).

A quantidade de fibra requerida para a rede estrela da Figura 1.3 pode ser deduzida da seguinte forma: Utilizando-se o Teorema de Pitágoras, calculam-se as hipotenusas dos vários triângulos formados por cada nó e depois multiplica-se o resultado por 2, já que cada nó está ligado ao acoplador estrela através de um par de fibras. As hipotenusas dos triângulos podem ser calculadas partindo-se dos nós que fazem parte do quadrado mais interno (formado por 4 nós), partindo-se em direção ao quadrado mais externo (no caso da Figura 1.3, formado por 12 nós). Os catetos que formam a base do triângulo têm comprimento que variam da seguinte forma: $l/2$, $l/2+l$, $l/2+2l$ e assim por diante, podendo ser generalizado da seguinte forma: $\left(\frac{l}{2} + (i-1) \cdot l\right)$, com $i = 1, 2, \dots, x$. Nesta fórmula, l é a distância entre nós adjacentes (na vertical ou na horizontal) em metros e x é a metade do número de nós contidos no lado do quadrado mais externo. Os catetos que formam a altura do triângulo variam da mesma forma. Como existem 8 triângulos retângulos iguais em cada quadrado analisado, calcula-se a hipotenusa de um deles e multiplica-se por 8. Nos triângulos que possuem os catetos com o mesmo tamanho, as hipotenusas coincidem no espaço, sendo, portanto, somadas duas vezes. Deve-se, então, retirar essa quantidade somada duas vezes.

$$F_{estrela} = 2 \cdot \sum_{i=1}^x \left\{ 8 \cdot \left[\sum_{j=1}^i \sqrt{\left(\frac{l}{2} + (i-1) \cdot l\right)^2 + \left(\frac{l}{2} + (j-1) \cdot l\right)^2} \right] - 4 \cdot \sqrt{\left(\frac{l}{2} + (i-1) \cdot l\right)^2 + \left(\frac{l}{2} + (i-1) \cdot l\right)^2} \right\} \quad (1.1)$$

Para encontrar o valor de x em função do número de nós, tem-se a seguinte análise: Para 4 nós, tem-se $x = 1$, para 16 nós tem-se $x = 2$, para 36 nós, tem-se $x = 3$, e assim por diante. O número “ x ”, portanto, equivale a $\frac{\sqrt{N}}{2}$, sendo N o número de nós da rede. A Equação (1.1) pode ser re-escrita da seguinte forma:

$$F_{estrela} = 2 \cdot \sum_{i=1}^{\frac{\sqrt{N}}{2}} \left\{ 8 \cdot \left[\sum_{j=1}^i \sqrt{l^2 \left(i - \frac{1}{2}\right)^2 + l^2 \left(j - \frac{1}{2}\right)^2} \right] - 4 \cdot \sqrt{l^2 \left(i - \frac{1}{2}\right)^2 + l^2 \left(i - \frac{1}{2}\right)^2} \right\} \quad (1.2)$$

Simplificando a equação (1.2), tem-se:

$$F_{estrela} = 8 \cdot l \cdot \sum_{i=1}^{\frac{\sqrt{N}}{2}} \left\{ 2 \cdot \left[\sum_{j=1}^i \sqrt{\left(i - \frac{1}{2}\right)^2 + \left(j - \frac{1}{2}\right)^2} \right] - \sqrt{2} \cdot \left(i - \frac{1}{2}\right) \right\} \quad (1.3)$$

A topologia anel simples utiliza N acopladores, que equivale ao número de nós da rede e o anel duplo utiliza o dobro, 2N acopladores, considerando-se que todos os nós estão conectados aos dois anéis. Os acopladores utilizados no anel podem ser passivos ou ativos. Os acopladores passivos podem ser acopladores direcionais [10], ou filtros ópticos com sintonia acústica independente de polarização (PIATOF's) [4], e os acopladores ativos podem ser unidades de interface de rede (NIU) [11]. Os acopladores passivos retiram uma fração da potência óptica do anel e selecionam o sinal desejado através de um filtro. Devido a sua perda de inserção, limitam o número máximo de nós que a rede pode suportar. Os acopladores ativos funcionam como repetidores, ou seja, o sinal de entrada recebido, depois de passado para a forma elétrica, é retirado do anel ou é enviado para o transmissor (para retornar ao anel na forma óptica), após um período equivalente à latência do nó. Estes acopladores fazem a regeneração do sinal em cada nó e, portanto, permitem um número maior de nós na rede, mas possuem a desvantagem de serem mais susceptíveis a falhas.

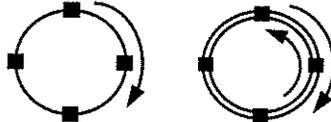


Figura 1.4 – Redes nas topologias anel simples e anel duplo, com 4 nós. As setas indicam o sentido de propagação da informação no anel.

Para uma rede anel, onde os nós estão distribuídos uniformemente, a quantidade de fibra utilizada na rede pode ser dada por:

$$F_{anel\ simples} = N \cdot l \quad (1.4)$$

onde l é a distância fixa entre nós adjacentes e N é o número de nós.

No caso do anel duplo, utiliza-se o dobro da quantidade de fibra.

$$F_{anel\ duplo} = 2 \cdot N \cdot l \quad (1.5)$$

A topologia barramento geralmente utiliza acopladores passivos e amplificadores ópticos ao longo do barramento. A topologia barramento dobrado, assim como a topologia barramento duplo, utiliza 2N acopladores, um para cada lado do barramento.

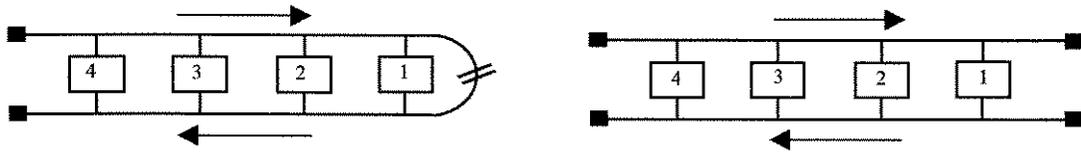


Figura 1.5 – Redes nas topologias barramento dobrado e barramento duplo, com 4 nós. As setas indicam o sentido de propagação da informação.

A quantidade de fibra utilizada para os dois tipos de barramentos, considerando-se que os nós estão dispostos uniformemente ao longo do barramento, é dada por:

$$F_{FUB} = F_{DUB} = 2(N - 1) \cdot l \quad (1.6)$$

sendo N o número de nós e l a distância fixa entre nós adjacentes.

A Figura 1.6 mostra uma comparação da quantidade de fibra utilizada nas diversas topologias.

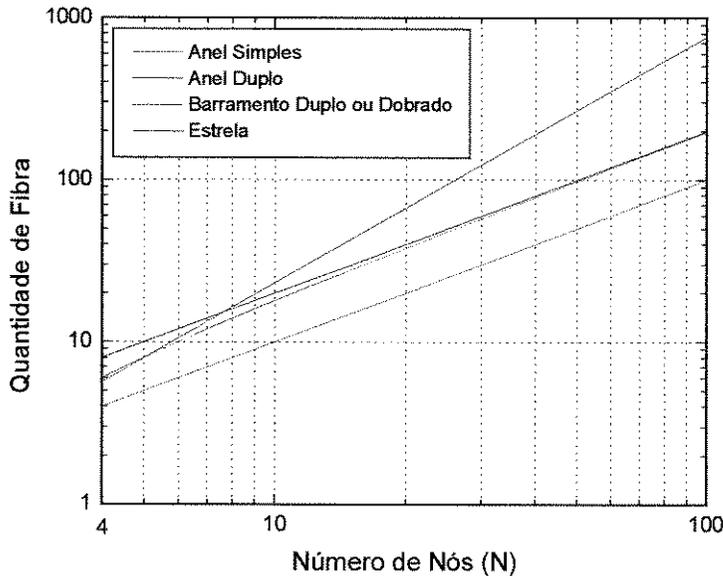


Figura 1.6 - Quantidade de fibra utilizada, em função do número de nós, para as topologias estrela, anel simples, anel duplo, barramento dobrado e barramento duplo. A quantidade de fibra é normalizada com relação à distância entre nós adjacentes.

Pela Figura 1.6 nota-se que a rede estrela é a que requer maior quantidade de fibra, para $N > 7$. Para $N \leq 7$, a estrela utiliza menos fibra que o anel duplo devido a disposição dos nós, como mostra a Figura 1.3. Numa rede com 100 nós, a estrela utiliza 3.8 vezes mais fibra que o anel duplo. A rede anel simples é a que requer menor quantidade de fibra, além de possuir fácil implementação. O anel simples, portanto, representa uma topologia atrativa para redes onde o custo é o fator principal no projeto. Considerando-se a tolerância a falhas na rede, o anel simples pode ser substituído pelo anel duplo, tal como utilizado em anéis SDH.

1.2.2 Balanço de Potência

Na análise do balanço de potência em uma rede óptica, determina-se primeiramente a diferença de potência óptica entre a potência de saída do transmissor óptico e a potência mínima requerida no receptor óptico, para uma determinada taxa de erro de bit (BER). O resultado desta diferença deve ser suficiente para compensar as perdas na fibra e nas conexões, assim como uma margem de segurança para prevenir os efeitos devido a temperatura e envelhecimento dos componentes.

$$P_T - S = \alpha \times L + A + M \quad (1.7)$$

onde P_T (dBm) é potência óptica média do transmissor, S (dBm) a sensibilidade do receptor, α (dB/Km) é a atenuação do sinal na fibra, L (Km) o comprimento da fibra, A (dB) é a perda nas conexões e M (dB) a margem de segurança do sistema.

Pode-se encontrar o número máximo de nós que uma rede pode suportar, através do valor da disponibilidade de potência óptica que pode ser perdida nas conexões da rede [1].

Os lasers a semicondutor atuais apresentam uma potência óptica média de 0 dBm (1 mW), enquanto que a sensibilidade dos receptores ópticos para detecção direta é dada por: $S = -40 + 10 \log B$ [dBm], onde B (Gbps) é a taxa de transmissão por estação. A margem de segurança geralmente é em torno de 5 dB [8] e a atenuação da fibra é 0.2 dB/Km em 1.55 μ m [1]. Para uma taxa de transmissão de 2.5 Gbps e um comprimento de fibra de 50 Km, tem-se uma disponibilidade de 21 dB de potência óptica para ser usada no cálculo dos nós. Considerando-se a possibilidade de utilizar um amplificador óptico, essa disponibilidade de potência pode ser em torno de 40 dB.

A atenuação do sinal óptico, provocada pelos acopladores utilizados na rede, pode ser calculada em função do número de nós da rede, levando-se em consideração a perda por divisão do sinal e excesso de perda (perda intrínseca do material). As deduções das fórmulas de atenuação para as diversas topologias são encontradas no Apêndice A.

A fórmula da atenuação, para a rede estrela, é dada por:

$$A_{estrela} = \frac{\beta_t \log_2 N}{N} \quad (1.8)$$

Para a rede anel simples, tem-se:

$$A_{anel\ simples} = \frac{4}{N^2} \cdot \left(1 - \frac{2}{N}\right)^{N-2} \cdot \beta_t^N \quad (1.9)$$

No anel duplo, o sinal passa por menos acopladores que no anel simples, porque a informação é enviada pela fibra que minimiza as distâncias entre os nós. A atenuação é dada por:

$$A_{anel\ duplo} = \frac{16}{(N+1)^2} \cdot \left(1 - \frac{4}{(N+1)}\right)^{\frac{N-3}{2}} \cdot (\beta_t)^{\frac{N+1}{2}} \quad (1.10)$$

Na rede barramento dobrado, um sinal enviado por um nó passa por mais acopladores para alcançar o seu destino do que no barramento duplo, isto ocorre porque o sinal é enviado no barramento superior e recebido somente no barramento inferior. A atenuação é dada por:

$$A_{bar.\ dobrado} = \frac{4}{(2N-1)^2} \cdot \left(1 - \frac{2}{(2N-1)}\right)^{2N-3} \cdot \beta_t^{2N-1} \quad (1.11)$$

A rede barramento duplo possui atenuação do sinal, provocada pelos acopladores ópticos, igual à do anel simples:

$$A_{bar.\ duplo} = \frac{4}{N^2} \cdot \left(1 - \frac{2}{N}\right)^{N-2} \cdot \beta_t^N \quad (1.12)$$

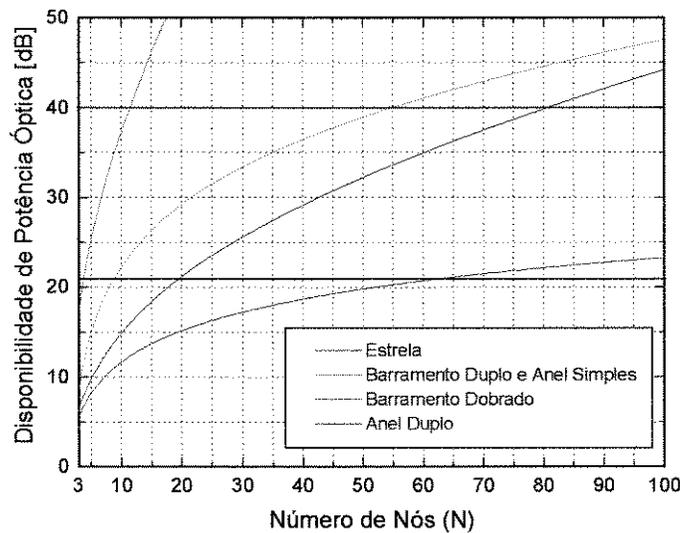


Figura 1.7 - Disponibilidade de potência óptica em função do número de nós para redes do tipo estrela, anel simples, anel duplo, barramento duplo e barramento dobrado, para $\beta_t = 0.5$ dB.

Assumindo que os excessos de perda nos acopladores direcionais (β_t) são de 0.5 dB, a Figura 1.7 apresenta uma comparação do número máximo de nós, para as diversas topologias. Para saber o número máximo de nós que cada tipo de topologia pode suportar, basta observar o cruzamento das curvas de atenuação com os valores de disponibilidade de potência a ser perdida nos acopladores (21 dB, para uma rede sem amplificador, e 40 dB, utilizando 1 amplificador na rede) e projetar este valor no eixo das abcissas. Pelo gráfico pode-se notar que a topologia estrela é a que pode suportar maior número de nós, isto porque o excesso de perda, neste tipo de rede, cresce logaritmicamente com o número de nós, enquanto que nos demais tipos de rede o excesso de perda cresce linearmente com o número de nós.

1.2.3 Atraso médio de propagação na fibra

O atraso que a informação leva desde a sua geração em uma estação até a sua chegada no destino está relacionado com o tempo de propagação na fibra e com o protocolo de acesso ao meio utilizado na rede. Como o meio físico é compartilhado por todas estações, o protocolo de acesso decide quem tem acesso ao meio para a transmissão. Quando a estação possui pacotes a transmitir, mas o seu acesso ao meio foi negado, o armazenamento temporário da informação no *buffer* gera um atraso que influi no tempo total de transmissão. Existe um protocolo apropriado para as características de cada tipo de rede e por isso eles serão analisados separadamente nos capítulos seguintes. Neste capítulo será analisado unicamente o atraso de propagação nas fibras ópticas, levando-se em consideração também a latência em cada acoplador de acesso.

O atraso médio entre nós, para a rede estrela, pode ser encontrado calculando o atraso entre nós que estão localizados a uma distância média do acoplador estrela. Para uma rede como a da Figura 1.3, a distância média equivale à quantidade média de fibra utilizada dividido pelo número de nós. Com isso, pode-se deduzir que:

$$\bar{\tau}_{estrela} = \frac{F_{estrela}}{N \cdot c} + \frac{b}{B} \text{ [seg]} \quad (1.13)$$

onde $F_{estrela}$ é a quantidade de fibra para a configuração estrela (1.3) em metros, N é o número de nós da rede, c é a velocidade da luz em m/s, b é a latência do acoplador de acesso em bits e B é a taxa de transmissão por canal em bit/s.

Para as redes anel e barramento, o atraso médio entre nós é analisado em função do atraso entre nós adjacentes. O atraso de propagação entre nós adjacentes para as redes anel e em barramento é dado por:

$$\tau = \frac{l}{c} + \frac{b}{B} \text{ [seg]} \quad (1.14)$$

que equivale ao atraso de propagação da informação na fibra mais o tempo de latência do nó, onde l é a distância entre nós adjacentes em metros, c é a velocidade da luz em m/s, b é a latência no acoplador de acesso em bits e B é a taxa de bit por canal em bit/s.

As deduções das fórmulas apresentadas a seguir encontram-se no Apêndice B.

No Anel simples, a informação trafega no sentido de transmissão do anel. O atraso médio de propagação de uma informação, enviada entre nós quaisquer na rede, é dado por:

$$\bar{\tau}_{anel\ simples} = \frac{N}{2} \tau \quad (1.15)$$

onde τ é o atraso entre nós adjacentes e N o número de nós da rede.

No anel duplo, considera-se que a informação trafega em sentidos opostos nas duas fibras (uma no sentido horário, outra no sentido anti-horário). Portanto, o nó transmissor irá enviar a informação para o nó destino na fibra que fornecer o menor caminho entre eles. O atraso médio de propagação entre nós, para o anel duplo, é dado por:

$$\bar{\tau}_{anel\ duplo} = \frac{N+1}{4} \tau \quad (1.16)$$

Na rede barramento dobrado, existem 2 opções: 1) os pacotes são enviados no barramento superior e recebidos no barramento inferior e 2) os pacotes são enviados no barramento superior e podem ser recebidos no barramento superior ou inferior. Para efeito de análise, será utilizada a segunda opção, já que ela apresenta um menor atraso de propagação entre nós. O atraso médio, na rede barramento dobrado, é dado por:

$$\bar{\tau}_{FUB} = \frac{2N-1}{3} \tau \quad (1.17)$$

No barramento duplo, as informações podem ser enviadas e recebidas em ambos os barramentos. O atraso médio entre nós, no barramento duplo, é:

$$\bar{\tau}_{DUB} = \frac{N+1}{3} \tau \quad (1.18)$$

A Figura 1.8 mostra uma comparação entre os atrasos de propagação para as diversas topologias:

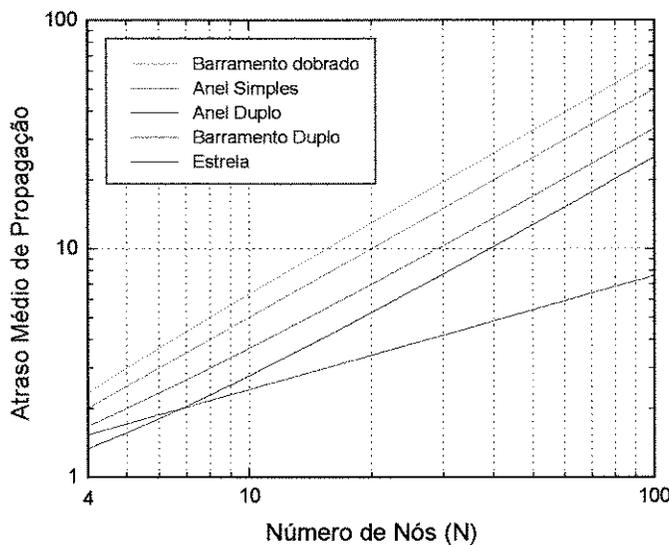


Figura 1.8 - Atraso médio de propagação em função do número de nós para as topologias estrela, anel simples, anel duplo, barramento dobrado e barramento duplo. O atraso de propagação médio é normalizado com relação ao atraso de propagação entre nós adjacentes.

Na Figura 1.8, pode-se notar que a topologia estrela é a que possui menor atraso médio entre nós, para $N > 6$. Para $N \leq 6$, a estrela apresenta desempenho inferior ao anel duplo à

disposição dos nós, mostrada na Figura 1.3. A rede barramento dobrado é a que possui maior atraso, pois a informação tem que passar por um grande número de acopladores antes de alcançar seu destino. Em redes de alta capacidade a topologia estrela representa a melhor opção.

1.3 Redes Híbridas

Devido a limitações tecnológicas, as redes WDMA possuem restrições que impedem sua exploração de modo a alcançar a capacidade da ordem de Tbps. Isto tem levado a combinação de técnicas de acesso, uma vez que as vantagens e desvantagens para cada esquema de acesso são diferentes. Com esquemas híbridos, pode-se conseguir capacidades de rede mais elevadas. A seguir são apresentados alguns exemplos de esquemas híbridos de acesso.

1.3.1 WDMA/SCMA

Neste esquema híbrido [21], a rede é organizada em aglomerados de M nós, e cada aglomerado possui um comprimento de onda óptico diferente λ_j ($j = 1, \dots, N$). O número total de nós que pode ser conectado à rede é, portanto, $N \times M$. Em cada aglomerado, M frequências de RF moduladas são combinadas, e a soma alimenta um único diodo laser banda larga operando no comprimento de onda λ_j . No receptor, a seleção de canal é realizada utilizando filtros ópticos sintonizáveis e receptores de RF sintonizáveis.

Uma outra variação deste esquema é o WDMA/SCMA totalmente óptico. Seu princípio consiste na multiplexagem dos dados e da informação de controle no mesmo comprimento de onda, com os dados codificados em banda base e os bits de controle codificados em uma frequência de sub-portadora escolhida apropriadamente. Cada nó utiliza uma frequência de sub-portadora diferente para codificar sua informação de controle. Chegado um pacote, uma fração da luz é detectada com um fotodetector convencional, sem a necessidade de filtros ópticos fixos ou sintonizáveis. A fotocorrente contém uma mistura dos dados na banda base, mas as sub-portadoras se mantêm distintas tal que a informação de controle pode ser retirada das sub-portadoras. As informações de controle decodificadas comutam o seletor de comprimento de onda para o comprimento de onda do pacote desejado. Uma linha de atraso é inserida entre o detector de cabeçalho e o seletor de comprimento de onda para permitir que o decodificador de cabeçalho e a lógica do nó realizem a comutação apropriadamente (ver Figuras 3.9 e 3.10).

1.3.2 WDMA/CDMA

Para aumentar o número de canais WDMA sem aumentar o número de comprimentos de onda, foi proposto codificar os canais dentro de cada banda utilizando seqüências de código pseudo-ortogonal antes de utilizar a técnica WDMA [21]. A codificação CDMA permite que

mais de um sinal WDM ocupe a mesma banda óptica, utilizando a codificação para separar os sinais que se sobrepõem. Isto significa que a configuração original WDM pode ser reagrupada em um número menor de bandas, aumentando-se o espaçamento entre canais e reduzindo a interferência.

1.3.3 WDM/TDMA

A combinação de WDM e TDMA tem sido aplicada em sistemas de comutação totalmente óptica de células ATM. O sistema ATMOS [21] é apresentado na Figura 1.9.

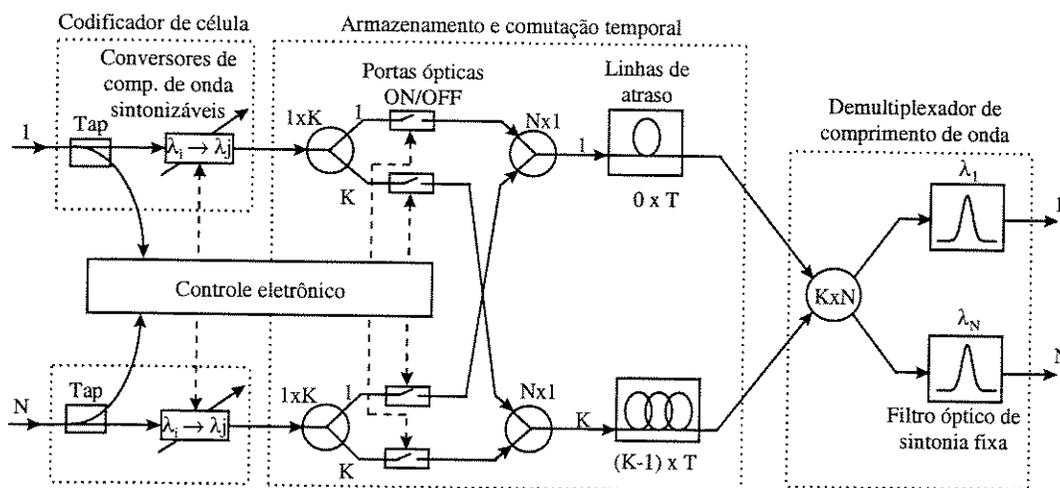


Figura 1.9 - Diagrama em blocos do sistema de comutação óptica ATMOS preservando a continuidade óptica de células ATM.

Apesar da eletrônica ser utilizada para propósitos de controle, a comutação é realizada totalmente no domínio óptico. Em cada porta de entrada uma pequena amostra da potência óptica é convertida para a forma elétrica para processamento pelos dispositivos de controle. A porção restante da potência óptica é direcionada a um conversor de comprimento de onda cujo comprimento de onda de saída é determinado pela porta de saída. Células ATM que tem o mesmo destino serão codificadas no mesmo comprimento de onda. Uma unidade de armazenamento, formada por um conjunto de linhas de atraso de fibras ópticas, evita que células ATM com o mesmo destino colidam na porta de saída. A unidade de controle eletrônico assegura que células codificadas no mesmo comprimento de onda não entrem na mesma linha de atraso ao mesmo tempo, de modo que células destinadas à mesma porta de saída fiquem armazenadas em linhas de atraso diferentes. As saídas das K linhas de atraso são então recombinadas por um acoplador passivo $K \times N$ cujas N saídas são filtradas por filtros de comprimento de onda fixo antes de uma eventual conversão opto-elétrica para recuperação de dados ou transmissão para um estágio de comutação subsequente.

Referências Bibliográficas

- [1] D. J. G. Mestdagh, "Fundamentals of multiaccess optical fiber networks", Artech House, 1995.
- [2] C. A. Brackett, "Dense wavelength division multiplexing networks: principles and applications", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 8, no. 6, 948-964, agosto 1990.
- [3] C. A. Brackett, "Is there an emerging consensus on wdm networking?", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, n° 6, pág. 936-941, junho 1996.
- [4] D. A. Smith, J. E. Baran, J. J. Johnson, K. Cheung, "Integrated-optic acoustically-tunable filters for wdm networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 8, no. 6, pág. 1151-1159, agosto 1990.
- [5] M. J. Karol, "Exploiting the attenuation of fiber-optic passive taps to create large high-capacity LAN's and MAN's", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 9, n° 3, pág. 400-408, março 1991.
- [6] L. F. G. Soares, G. Lemos, S. Colcher, "Redes de Computadores - Das LAN's, MAN's e WAN's às Redes ATM", Segunda Edição, Editora Campus, 1995.
- [7] A. S. Tanenbaum, "Computer Networks", Terceira Edição, Prentice Hall, 1996.
- [8] W. F. Giazza, E. Conforti, H. Waldman, "Fibras Ópticas - Tecnologia e Projeto de Sistemas", Makron Books e McGraw-Hill, 1991.
- [9] T. N. Saadawi, M. H. Ammar, A. E. Hakeem, "Fundamentals of Telecommunication networks", John Wiley & Sons, 1994.
- [10] B. Glance, C. R. Doerr, I. P. Kaminow, R. Montagne, "Optically restorable WDM ring network using simple add/drop circuitry", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, n° 11, pág. 2453-2456, novembro 1996.
- [11] K. Y. Eng, "A multi-fiber ring architecture for distributed lightwave networks", *Proc. ICC'88*, pág. 1490-1496, junho 1988.
- [12] O. K. Tonguz, K. A. Falcone, "Fiber-optic interconnection of local area networks: physical limitations of topologies", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 11, n° 5/6, pág. 1040-1052, maio/junho 1993.
- [13] M.S. Goodman, H. Kobriniski, M.P. Vecchi, R.M. Bulley, J.L. Gimlett, "The lambdanet multiwavelength network: architecture, applications, and demonstrations", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.8, n° 6, pág. 995-1003, agosto 1990.

- [14] E. Arthurs, M.S. Goodman, H. Kobrinski, M.P. Vecchi, "Hypass: an optoelectronic hybrid packet switching system", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 6, n° 9, pág. 1500-1509, dezembro 1988.
- [15] E. Arthurs, J.M. Cooper, M.S. Goodman, H. Kobrinski, M. Tur, M.P. Vecchi, "Multiwavelength optical crossconnect for parallel-processing computers", *Electronics Letters*, vol. 24, n° 2, pág. 119-120, janeiro 1988.
- [16] C. Dragone, "Efficient N×N star coupler based on Fourier optics", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 7, n° 3, pág. 479-489, 1989.
- [17] K. Okamoto, "Fabrication of wavelength-insensitive 8×8 star coupler", *IEEE Photonic Technology Letters*, vol. 4, n° 1, pág. 61-63, janeiro 1992.
- [18] A. A. M. Saleh, H. Kogelnik, "Reflective single-mode fiber-optic passive star couplers" *Journal of Lightwave Technology*, vol. 6, n° 3, pág. 392-398, março 1988.
- [19] T. Hermes, "Coherent bidirectional broadband communication experiment using a reflective star coupler", *Proc. European Conf. Opt. Communication, ECOC'91, Paris*, pág. WeB9-6, setembro 1991.
- [20] P. Green, "Fiber Optic Networks", Prentice Hall, 1993.
- [21] D. J. G. Mestdagh, "Multiple access techniques for fibre-optic networks", *Optical Fiber Technology*, vol.2, pág. 7-54, 1996.

Capítulo 2

Redes WDMA na Topologia Estrela

Neste capítulo são apresentadas as configurações de um salto e vários saltos para a topologia estrela. Um estudo é feito sobre alguns fatores que limitam a capacidade máxima da rede para as duas configurações. Um protocolo de acesso ao meio é apresentado para redes de comutação de pacotes, e um estudo de desempenho é realizado com ênfase na vazão e no atraso médio da rede.

Nesta topologia, cada nó é interligado a um nó central através do qual passa todo o tráfego da rede. Em redes ópticas, o nó central é geralmente representado por um acoplador estrela passivo, o qual recebe as informações geradas por cada nó da rede pelas fibras de entrada e envia parcelas da potência deste sinal para todos os outros nós da rede através das fibras de saída. Os nós se encarregam de fazer a seleção dos sinais destinados a eles. Os nós, aos quais as informações são destinadas, convertem o sinal óptico recebido em sinal elétrico para sua futura análise; os demais nós simplesmente descartam o sinal. Nem todas as redes estrela são de difusão. Elas podem também fazer uso de roteamento, fazendo com que a informação enviada alcance somente o nó destino. Neste caso componentes seletores de comprimento de onda são utilizados. As redes na topologia estrela podem suportar tráfegos de comutação de pacotes ou comutação de circuitos. Na comutação de pacotes, os pacotes são enviados do nó fonte para o nó destino, através do nó central no momento apropriado. Na comutação de circuitos, uma conexão é previamente estabelecida entre o nó fonte e o nó destino, e esta existirá durante todo o envio de informações. Neste caso, se já existir uma conexão ligando estas duas estações, nenhuma outra conexão pode ser estabelecida para estes

nós. O protocolo de comunicação da rede irá se encarregar de controlar o acesso ao meio em cada um dos tipos de tráfego da informação.

A confiabilidade da rede estrela é praticamente determinada pela confiabilidade do nó central. No caso de redes passivas, a confiabilidade da rede é alta, uma vez que o nó central é formado por componentes passivos que são pouco susceptíveis a falhas. Em redes ativas, ocorre a detecção do sinal no nó central e portanto esta rede se torna menos confiável. Se uma falha ocorre em um dos nós da rede ou no par de fibras que interliga este nó ao nó central, esta falha não afeta o funcionamento da rede, afetando somente o funcionamento daquela estação. Quanto à modularidade, uma rede com esta topologia pode ser expandida até um certo limite, imposto pelo nó central [8].

2.1 Estrela de Um Salto

Nas redes WDMA de um salto [12], os dados enviados pelo nó transmissor alcançam diretamente o seu destino, sem a necessidade da conversão do sinal para a forma elétrica. Estas redes requerem dispositivos de comprimento de onda sintonizáveis em cada nó para estabelecer um padrão de conectividade desejável.

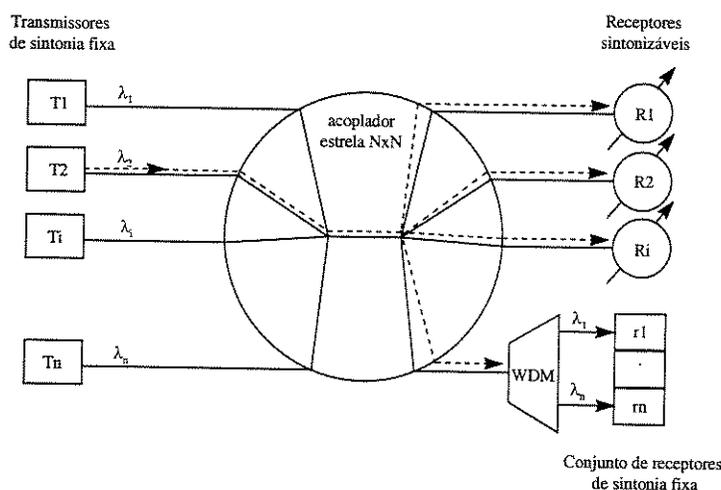


Figura 2.1 - Rede WDMA de um salto na topologia estrela.

Alguns exemplos de redes na configuração estrela de um salto são: Lambdanet [1, 2], Fox [3], HYPASS [4] e Star-track [5].

As redes WDMA de difusão de um salto geralmente precisam de amplificação óptica para compensar a divisão de potência óptica. Uma vez que a banda passante dos amplificadores ópticos é da ordem de 30 nm, a rede é restrita a 30 canais individuais WDMA separados por 1nm. Portanto a máxima largura de banda útil é determinada pela largura de banda dos amplificadores ópticos.

Como as redes WDMA de um salto podem ser TT-FR, FT-TR ou TT-TR, pode-se fazer uma análise para saber qual das configurações atinge maior capacidade de rede. Para isso são feitas algumas considerações:

- Cada nó tem conhecimento do *status* (livre ou ocupado) de todos os comprimentos de onda no sistema.
- Não há *buffer* na entrada dos nós, ou seja, quando um pacote é gerado, ele é transmitido ou perdido, dependendo se a conexão é permitida ou não.
- Número de nós: N .
- Número de comprimentos de onda disponíveis: W ($W < N$).
- Um pacote chegando no nó i é endereçado para o nó j com probabilidade $1/N$, qualquer que seja i e qualquer que seja j .
- O atendimento dos pacotes em cada nó obedece a distribuição exponencial com taxa média de $1/\mu$ [segundos/pacote].
- A chegada dos pacotes em cada nó obedece a distribuição de Poisson com uma taxa média de Λ [pacotes/segundo].
- A carga média de cada estação é, portanto, igual a $\rho = \Lambda\mu$.

O comportamento dinâmico de ω (número de comprimentos de onda ocupados) pode ser modelado utilizando-se o processo de nascimento e morte de teoria de filas. O diagrama de transição de estado [11] é mostrado a seguir:

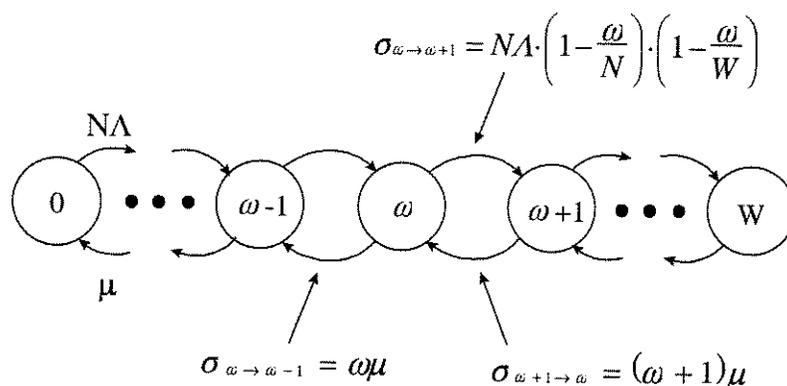


Figura 2.2 - Diagrama de transição de estado para transmissores sintonizáveis e receptores fixos ou para transmissores fixos e receptores sintonizáveis.

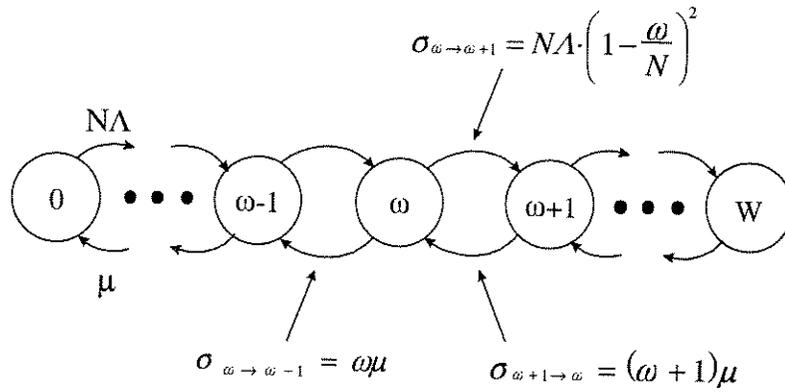


Figura 2.3 - Diagrama de transição de estado para transmissores e receptores sintonizáveis.

Para os casos das figuras 2.2 e 2.3 a transição de estado para a esquerda (morte) resulta da liberação de um comprimento de onda ocupado após uma conexão com sucesso. A probabilidade de transição de estado para a direita (nascimento), que corresponde a ativação de um novo comprimento de onda, depende de onde a sintonia está localizada.

A probabilidade p_ω (probabilidade de ω comprimentos de onda estarem ocupados) pode ser obtida aplicando-se as Equações de Balanço Local (Chandy). Pela notação de Kendall, pode-se dizer que tem-se uma fila do tipo M/M/W/0/N, ou seja:

- A distribuição do tempo de chegada é Poissoniana
- A distribuição do tempo de serviço é Exponencial Negativa
- O número de servidores é igual a W (número de comprimentos de onda disponíveis)
- A capacidade do *buffer* é nula (não há *buffer*)
- O número de elementos da população que gera as mensagens é igual a N (número de transmissores)

As equações de balanço local para os dois casos (Figura 2.2 e Figura 2.3) são calculadas no apêndice C, e os resultados são apresentados a seguir.

Para o caso de transmissores ou receptores sintonizáveis, tem-se:

$$p_\omega = \frac{\frac{N^\omega \rho^\omega}{\omega!} \cdot \prod_{i=0}^{(\omega-1)} \left[\left(1 - \frac{i}{N}\right) \cdot \left(1 - \frac{i}{W}\right) \right]}{\sum_{j=0}^W \left[\frac{N^j \rho^j}{j!} \cdot \prod_{t=0}^{j-1} \left[\left(1 - \frac{t}{N}\right) \cdot \left(1 - \frac{t}{W}\right) \right] \right]} \quad (2.1)$$

Para o caso de transmissores e receptores sintonizáveis, tem-se:

$$p_\omega = \frac{\frac{N^\omega \rho^\omega}{\omega!} \cdot \prod_{i=0}^{(\omega-1)} \left(1 - \frac{i}{N}\right)^2}{\sum_{j=0}^W \left[\frac{N^j \rho^j}{j!} \cdot \prod_{t=0}^{j-1} \left(1 - \frac{t}{N}\right)^2 \right]} \quad (2.2)$$

Como o número de pacotes transmitidos com sucesso por unidade de tempo é igual ao número médio de comprimentos de onda ocupados no sistema, a capacidade da rede pode ser obtida por:

$$C = \bar{\omega} \cdot B \cdot \rho \quad [\text{Gbps}] \quad (2.3)$$

onde B é a taxa de bit por nó em Gbps, ρ é a carga média e $\bar{\omega}$ é dado por:

$$\bar{\omega} = \sum_{\omega=0}^W p_{\omega} \cdot \omega \quad (2.4)$$

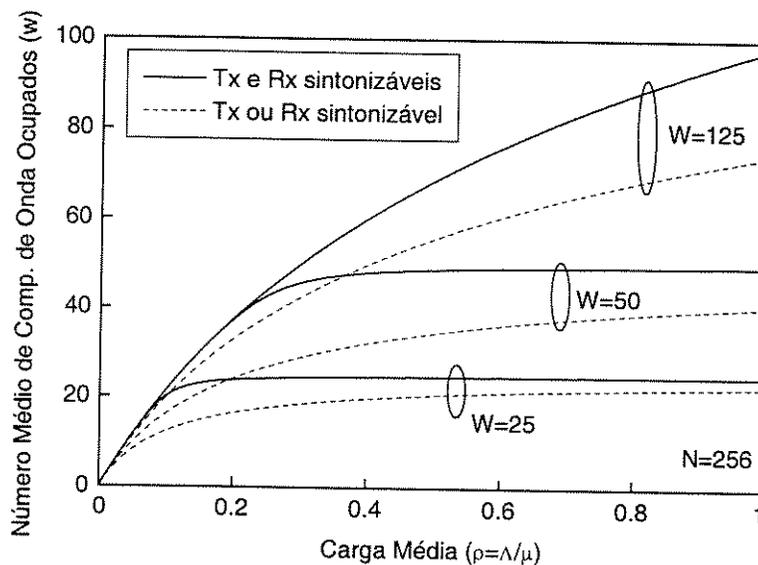


Figura 2.4 - Número médio de comprimentos de onda ocupados na rede, em função da carga média por nó, para 25, 50 e 125 comprimentos de onda disponíveis, em redes WDMA de difusão de um salto com 256 nós.

Pela Figura 2.4, nota-se que o melhor desempenho é obtido quando ambos transmissores e receptores sintonizam toda a faixa de banda utilizada.

O canal de controle é utilizado para comunicar, a cada transceptor, a informação sobre qual comprimento de onda ele deve sintonizar. Supondo que os nós sejam identificados por bits, é necessário 1 bit para identificar os nós de uma rede de 2 nós (nó 0 e nó 1), 2 bits para identificar os nós de uma rede de 4 nós (nó 00, nó 01, nó 10 e nó 11) e assim por diante. Isto requer uma especificação de endereço de pelo menos $\log_2 N$ bits por transceptor tal que, com N nós de rede, o canal de controle deve transportar pelo menos $N \cdot \log_2 N$ bits de sinalização para estabelecer todas as conexões da rede. A capacidade da rede em função da limitação do canal de controle é encontrada deduzindo-se a fórmula da capacidade em função de parâmetros do canal de controle. A capacidade do canal de controle (C_c) pode ser dada por:

$$C_c = \frac{N \cdot \log_2 N}{T_{\text{ocupação}}} \quad [\text{Gbps}] \quad (2.5)$$

onde N é o número de nós da rede e o tempo de ocupação da conexão é dado por:

$$T_{\text{ocupação}} = \frac{x \cdot bd}{B} \quad [\text{ns}] \quad (2.6)$$

onde x é um valor inteiro positivo, bd é o tamanho do pacote de dados em bits e B é a taxa de transmissão por estação em Gbps.

O tempo de ocupação de uma conexão depende se a rede suporta tráfego de comutação de circuitos (tempo de ocupação longo) ou tráfego de comutação de pacotes na qual as conexões devem ser estabelecidas e desfeitas muito rapidamente. Para a análise crítica, em redes de comutação de pacotes, faz-se x igual a 1. Logo a capacidade da rede é dada por:

$$C = \frac{x \cdot bd}{\log_2 N} \cdot C_c \quad [\text{Gbps}] \quad (2.7)$$

Dois casos foram analisados: uma rede com pacotes de dados curtos (~50 bytes) e uma rede com pacotes de dados longos (~2000 bytes).

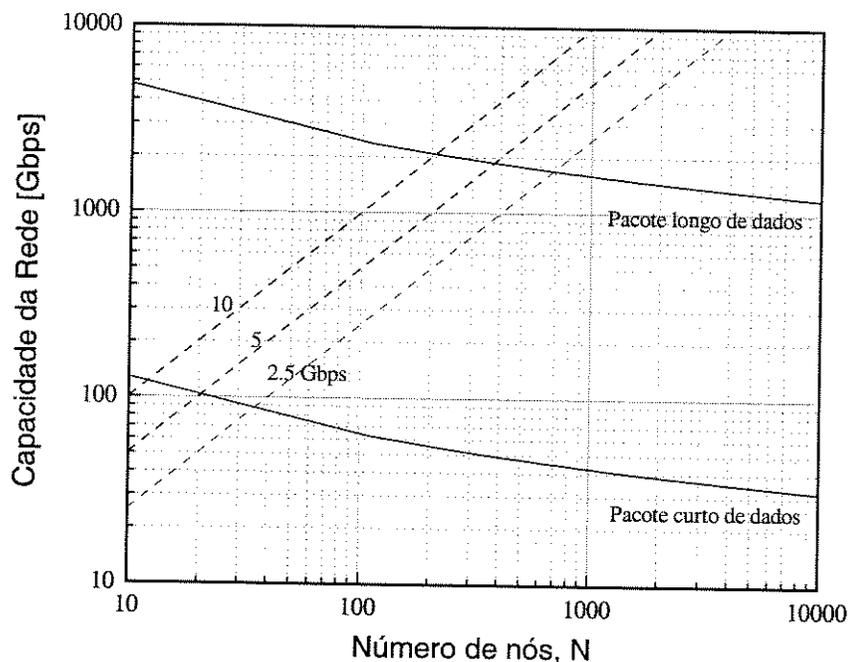


Figura 2.5 - Limite da capacidade da rede, utilizando um canal de controle operando em 1 Gbps, para pacotes curtos (50 bytes de comprimento) e para pacotes longos (2000 bytes de comprimento).

A Figura 2.5 mostra o limite da capacidade da rede utilizando-se um canal de controle operando em 1 Gbps. As linhas tracejadas paralelas correspondem às taxas de transmissão de cada nó de 2.5, 5 e 10 Gbps. Para o caso de pacotes de dados curtos, a rede se restringe a uma capacidade aproximadamente de 100 Gbps. O número de nós, neste caso, é limitado em 35 ($B = 2.5$ Gbps), 20 ($B = 5$ Gbps) e 11 ($B = 10$ Gbps). Para o caso de uma rede com pacotes

curtos, a capacidade da rede é limitada pelo canal de controle mais do que pelo balanço de potência [5]. No caso de pacotes longos, o limite imposto pelo canal de controle é em torno de 1.8 Tbps. Como para acima de 100 nós, a capacidade da rede é limitada pelo balanço de potência em aproximadamente 1 Tbps se a detecção direta é utilizada [5], a detecção coerente pode ser utilizada para maximizar a capacidade. Mas, neste caso, o tamanho da rede fica restrito a 687 ($B = 2.5$ Gbps) nós.

2.2 Estrela de Vários Saltos

Em redes de comutação de circuitos, a velocidade requerida dos transceptores sintonizáveis é geralmente baixa. Contudo, em redes de comutação por pacote, os nós devem ser capazes de trocar de sintonia de comprimento de onda rapidamente. Isto acontece porque, em redes de comutação de circuitos, existe uma conexão previamente estabelecida entre os nós, dispensando o armazenamento dos pacotes e processamento da informação de destino, que ocorre na comutação de pacotes, nos nós intermediários. Como o tempo de sintonia dos transceptores atuais é relativamente longo (comparado à duração do pacote) foi proposta a rede WDMA de vários saltos [10], que utilizam transceptores fixos, e por isso mais adequadas para comutação de pacotes. As conexões entre os pares de nós são alcançadas pela retransmissão dos dados através de nós intermediários, portanto não requerem transceptores sintonizáveis. Redes de vários saltos não são redes passivas, uma vez que conversões opto-elétricas e eletro-ópticas ocorrem nos nós intermediários.

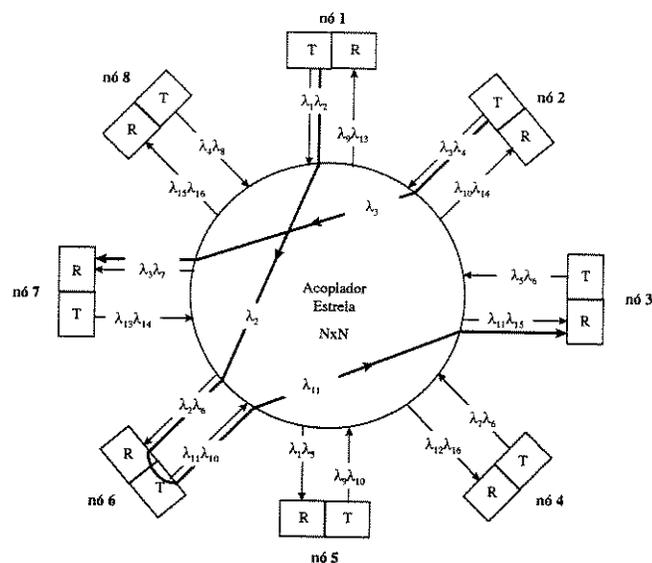


Figura 2.6 - Rede WDMA de vários saltos na topologia estrela.

O padrão de conectividade (*Shufflenet*) da Figura 2.6 é apresentado na Figura 2.7 [10], no qual as setas de cada nó transmitindo em um comprimento de onda particular são direcionadas a todos os nós que recebem aquele comprimento de onda.

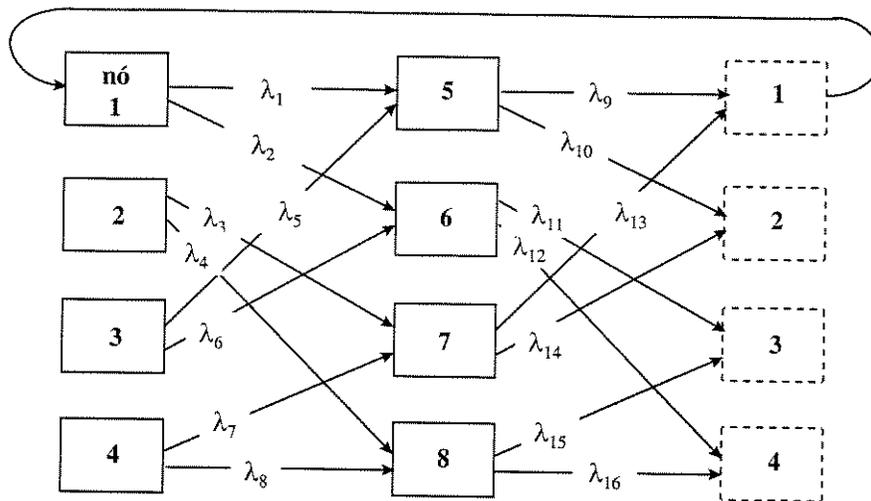


Figura 2.7 - Gráfico do padrão de conectividade de comprimento de onda (*Shufflenet*) para rede com oito nós.

Múltiplos formatos de transmissão podem ser suportados simultaneamente sobre a rede, desde que conversores de comprimento de onda adicionais sejam incorporados aos nós. Deste modo, pacotes recebidos, cujos formatos não são compatíveis com a eletrônica do nó, podem ser retransmitidos opticamente via conversores de comprimento de onda sem a necessidade de conversão opto-elétrica. Uma outra característica atrativa da rede WDMA de vários saltos é que, ao contrário das redes WDMA de um salto, um canal de controle não é requerido.

A *Shufflenet* [10] pode ser representada por um gráfico no qual há p arcos saindo e p arcos chegando em cada nó. O gráfico da *Shufflenet* é construído arranjando-se N nós em k colunas de p^k nós cada uma, com a última coluna sobrepondo a primeira (de modo semelhante a um cilindro), de modo que $N = k \cdot p^k$ ($k=1,2,\dots$). O número de comprimentos de onda distintos utilizados na rede é igual ao número total de arcos no gráfico, ou seja, kp^{k+1} . Um dos problemas associados a conectividade da *Shufflenet* é que ela não é modular, uma vez que, o número de nós deve obedecer sempre a relação $N = k \cdot p^k$.

Supondo tráfego uniforme, o número médio de saltos entre nós, selecionados aleatoriamente, é dado por [10]:

$$h = \frac{k \cdot p^k \cdot (3k - 1) \cdot (p - 1) - 2k \cdot (p^k - 1)}{2 \cdot (p - 1) \cdot (kp^k - 1)} \quad (2.8)$$

$$h \xrightarrow{N \text{ grande}} \log_p N$$

Devido aos vários saltos, somente uma fração da capacidade dos enlaces é utilizada para transportar novos tráfegos, enquanto que a porção restante da capacidade dos enlaces é utilizada para o tráfego retransmitido. Se houvesse somente um salto para todas as conexões, a capacidade da rede seria igual ao produto do número de canais WDM vezes a taxa de bit por

canal (B). Como há uma média h de saltos, a capacidade da rede *Shufflenet* (para novos tráfegos), assumindo um algoritmo de roteamento que equilibra a carga do tráfego nos canais, é dada por:

$$C = \frac{kp^{k+1} \cdot B}{h} \quad (2.9)$$

Utilizando as equações 3.2 e 3.3, a vazão máxima por nó é dada por:

$$\frac{C}{N} = \frac{2p \cdot (p-1) \cdot (kp^k - 1) \cdot B}{k \cdot p^k \cdot (p-1) \cdot (3k-1) - 2k \cdot (p^k - 1)} \quad (2.10)$$

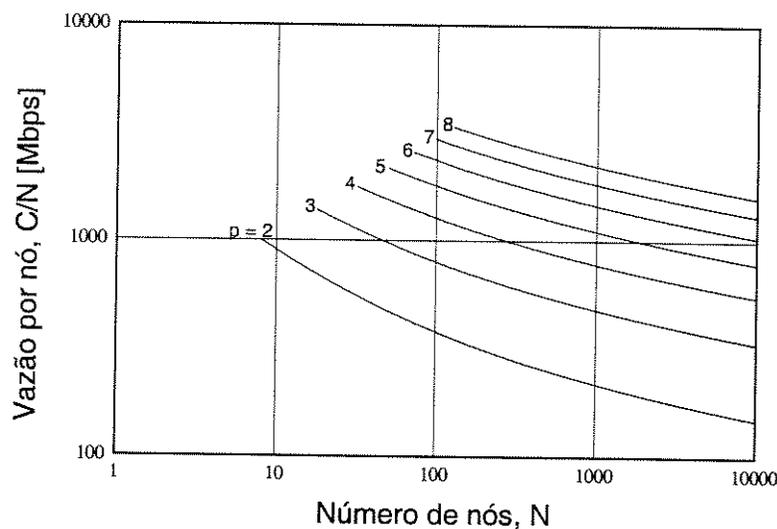


Figura 2.8 - Vazão por nó versus o número de nós, para redes WDMA de vários saltos *Shufflenet*, com p transceptores em cada nó.

2.3 Protocolo de Acesso ao Meio

Neste trabalho, a capacidade da rede (C) é definida como a taxa de bit de cada nó vezes o número de nós da rede. A vazão da rede (γ) é definida como a capacidade total que a rede pode alcançar, levando-se em consideração as características do protocolo de acesso ao meio utilizado.

Dentre os protocolos de acesso ao meio existentes para rede estrela, foi escolhido para estudo um protocolo que obtivesse um bom desempenho de atraso médio de propagação de pacotes e, também, de vazão para redes com tráfego de comutação de pacotes.

O tráfego de comutação de circuitos pode ser facilmente suportado em redes WDMA através de protocolos *request-and-response*. Mas este tipo de protocolo não é adequado para tráfego de comutação de pacotes, uma vez que o pacote sofre um atraso de pelo menos o tempo de ida e volta antes de ser transmitido, que equivale ao tempo requerido para o

transmissor anunciar sua intenção de transmissão e para o receptor informar sua disponibilidade. Protocolos com passagem de ficha também não apresentam um bom desempenho em redes de área metropolitana (MANs) devido ao grande atraso de propagação em relação ao comprimento do pacote. O mesmo é válido para esquemas de acesso aleatório tais como acesso múltiplo por sub-portadora (SCMA). Esquemas com alocação de banda estática utilizando acesso múltiplo por divisão no tempo (TDMA) provêm largura de banda garantida, porém não é apropriado para tráfego de rajada. O protocolo escolhido para análise utiliza acesso múltiplo por divisão de comprimento de onda com alocação dinâmica do tempo (DT-WDMA) [7]. O protocolo DT-WDMA utiliza a técnica WDMA para transmissão dos dados entre as diversas estações e a técnica TDMA no canal de controle dedicado para troca de informações de *status*. Um algoritmo de arbitragem determinístico comum é utilizado para selecionar uma transmissão de um conjunto de transmissões concorrentes.

O protocolo a ser analisado é indicado para redes de difusão na configuração estrela de 1 salto, com dois lasers fixos, um receptor fixo e um receptor sintonizável. Um transmissor emite no comprimento de onda próprio da estação (λ_i) e o outro emite em um comprimento de onda comum (λ_c) compartilhado por todas as estações. O canal de comprimento de onda comum (canal de controle) é utilizado para troca de mensagens de controle e os canais específicos de cada estação (canais de dados) são utilizados para a transmissão dos dados. As saídas dos 2 lasers são acopladas a um combinador 2×1 , cuja saída é conectada, por meio de uma fibra óptica, a uma das entradas de um acoplador estrela $N \times N$ localizado na parte central da rede. Em cada porta de saída do acoplador estrela estão disponíveis os N comprimentos de onda (referentes às N estações) mais o comprimento de onda de controle. Cada porta de saída do acoplador estrela está ligada a um receptor. No receptor, o sinal óptico é dividido em duas partes por meio de um divisor 1×2 . Uma parte do sinal vai para um filtro óptico fixo que deixa passar somente o comprimento de onda do canal de controle e a outra parte vai para um filtro óptico sintonizável, o qual pode deixar passar qualquer um dos comprimentos de onda de dados.

2.3.1 Descrição do Protocolo

Assume-se a existência de um relógio comum obtido pela distribuição do relógio a todas as estações [9] ou por meio de um mecanismo de relógio inerente aos dados. Quando uma estação se une à rede, ela utiliza seu comprimento de onda (λ_i) para medir sua distância até o *hub*, isto é, o tempo de propagação entre a estação e o acoplador estrela. As estações ajustam seus relógios com relação ao *hub* e todo o tempo é medido com relação ao relógio do

hub. O tempo é dividido em *slots*. *Slots* dos canais de dados (*slots* de dados) contém pacotes de dados. *Slots* do canal de controle (*slots* de *status*) carregam informações de *status* do pacote e do transmissor. A duração de um pacote de dados é menor que o tempo do *slot*. Um *slot* de *status* é dividido em N *mini-slots*, sendo que cada *mini-slot* é designado a um transmissor.

Existem 3 campos em cada *mini-slot*:

1. Endereço do Destino
2. Atraso: Atraso do pacote desde o tempo de chegada no transmissor até a sua chegada no receptor (diferença entre o tempo de transmissão e o tempo de chegada no transmissor mais o tempo que o pacote leva para alcançar o destino).
3. Modo do Transmissor: comutação de pacotes ou comutação de circuitos.

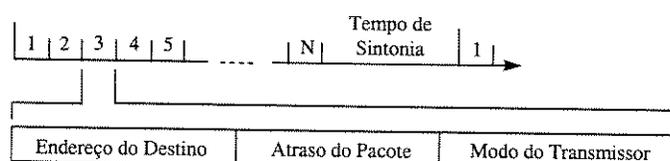


Figura 2.9 - Formato dos *mini-slots* de *status* do canal de controle.

Os *slots* de dados e de *status* têm o mesmo comprimento. O comprimento do *slot* é igual ao comprimento máximo do pacote ou dos N *mini-slots* de *status*, mais o tempo necessário para a sintonia dos receptores em um determinado canal.

A transmissão é feita da seguinte forma:

Cada transmissor contém uma fila de pacotes. Cada pacote é marcado com o tempo de chegada e um *flag* de *status*, que pode ser “pendente” ou “em espera”. Um pacote está pendente se ele já foi transmitido, mas o resultado da transmissão ainda não é conhecido; caso contrário o pacote está esperando para ser transmitido. A política de agendamento para transmissão dos pacotes é FIFO, isto é, o pacote com o menor tempo de chegada é o escolhido para transmissão. Quando um pacote é transmitido, seu *flag* de *status* é mudado de “em espera” para “pendente”.

Antes de uma determinada estação i transmitir um pacote, ela primeiramente envia o endereço de destino (j) e o atraso do pacote no i -ésimo *mini-slot* do *slot* de *status* (t). No próximo *slot* de dados ($t+1$) a estação transmite o pacote de dados no comprimento de onda λ_i . O resultado da transmissão é conhecido pela estação i depois de um tempo equivalente ao tempo de propagação de ida e volta da estação até o acoplador estrela. Se a transmissão é bem sucedida, a estação i remove o pacote da fila. Em caso de insucesso o *flag* de *status* do pacote é mudado de “pendente” para “em espera” e o pacote permanece na fila para retransmissão.

Como este pacote possui o tempo de chegada menor que o dos pacotes recém gerados, ele tem prioridade na transmissão.

Cada receptor monitora continuamente cada *mini-slot* no comprimento de onda do canal de controle. Depois de examinar todos os *mini-slots* do *slot* t , a estação j sabe se algum pacote de dados no *slot* de dados seguinte (*slot* $t+1$) é destinado à ela. Quando mais de um pacote é destinado à j , esta estação seleciona um deles baseado em regras de arbitração. A estação j ajusta seu filtro sintonizável no comprimento de onda do pacote de dados escolhido antes do próximo *slot* de dados começar.

O algoritmo de arbitração deve ser invocado quando mais de um pacote é transmitido no mesmo *slot* de dados para o mesmo receptor. Como todas as estações recebem todos os *mini-slots*, cada transmissor pode determinar o resultado de sua transmissão sem a necessidade de reconhecimentos explícitos. O tempo entre duas transmissões do mesmo pacote é, portanto, o tempo de propagação de ida e volta entre o transmissor e o acoplador estrela, ao invés do tempo de propagação de ida e volta entre o transmissor e o receptor. Isto reduz o atraso do pacote. Quando vários pacotes são endereçados para o mesmo receptor, o receptor sintoniza um dos comprimentos de onda e recebe um pacote com sucesso. Os outros pacotes não interferem na recepção do pacote escolhido ou nos pacotes endereçados a outros receptores. Todas as estações utilizam o mesmo algoritmo determinístico de arbitração.

Na simulação, leva-se em consideração uma rede com N estações com somente tráfego de comutação de pacotes. Os pacotes são gerados em cada estação transmissora por um processo de Bernoulli independente. Um pacote é gerado na estação i com probabilidade p_i em cada *slot*. Foi assumido tráfego uniforme, isto é, um pacote é transmitido com igual probabilidade para qualquer uma das $N-1$ estações restantes. Todas as estações têm probabilidade $p_i = \rho$, para todo i , de gerar um pacote em um *slot* (ρ é a carga oferecida por estação).

O programa de simulação tem como parâmetros de entrada:

1. Número de estações;
2. A configuração, que é o conjunto de distâncias das estações até o acoplador estrela;
3. Taxa de transmissão por estação;
4. Tamanho do pacote de dados;
5. Tempo de sintonia do filtro;
6. Tempo de simulação.

E tem como parâmetros de saída:

1. Vazão (γ): número de pacotes da rede transmitidos com sucesso por *slot* (γ_e é a vazão por estação por *slot*);
2. Atraso médio (D): média dos intervalos entre os instantes de geração e recepção do pacote.

2.3.2 Análise Teórica

Nesta análise, todas as estações estão equidistantes do acoplador. Considera-se que pacotes gerados têm prioridade na transmissão sobre pacotes transmitidos sem sucesso para que possa ser encontrada uma solução analítica no cálculo da vazão máxima. Ou seja, para $p = 1$, somente pacotes recém gerados são transmitidos em cada *slot* e, com isso, transmissões em *slots* diferentes estão descorrelacionadas. A vazão do sistema modificado é encontrada calculando-se o número médio de receptores diferentes escolhidos por um conjunto de N transmissões em um *slot*.

f_k é uma função que denota se a estação k é selecionada como destino, ou seja,

$$f_k = \begin{cases} 1 & \text{se a estação } k \text{ é selecionada} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.11)$$

e as probabilidades da estação k ser ou não selecionada como destino são dadas por [7]:

$$P\{f_k = 0\} = \left(1 - \frac{1}{N-1}\right)^{N-1} \quad k = 1, \dots, N \quad (2.12)$$

e

$$P\{f_k = 1\} = 1 - \left(1 - \frac{1}{N-1}\right)^{N-1} \quad k = 1, \dots, N \quad (2.13)$$

A vazão total por *slot* (γ) é dada por:

$$\gamma = E\left[\sum_{k=1}^N f_k\right]$$

$$\gamma = N \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{1}{N-1}\right)^{N-1}\right] \quad (2.14)$$

A vazão por estação por *slot* é então:

$$\gamma_e = 1 - \left(1 - \frac{1}{N-1}\right)^{N-1} \rightarrow 1 - e^{-1} \text{ à medida que } N \rightarrow \infty \quad (2.15)$$

Portanto, para N grande, a vazão máxima da rede por *slot* é dada por:

$$\gamma = (1 - e^{-1}) \cdot N = 0.63N \quad (2.16)$$

Para obter a medida real da vazão em bits por segundo, o *overhead* devido aos *mini-slots* e ao tempo de sintonia devem ser considerados. Considerando-se B a taxa de bit por nó, t_{sint} o tempo de sintonia do filtro sintonizável, bs o número de bits de um *mini-slot* e bd o tamanho do pacote de dados em bits, o tamanho de um *slot* em bits é dado por:

$$\text{tamanho_slot} = \max(bd, N \cdot bs) + B \cdot t_{sint} \quad (2.17)$$

e a vazão da rede é dada por:

$$\gamma = 0.6 \cdot N \cdot B \cdot \frac{bd}{\text{Tamanho_slot}}$$

$$\gamma = 0.6 \cdot N \cdot B \cdot \frac{bd}{\max(bd, N \cdot bs) + B \cdot t_{sint}}$$

$$\gamma = \begin{cases} 0.6 \cdot N \cdot B \cdot \frac{bd}{bd + B \cdot t_{sint}}, & N \leq \frac{bd}{bs} \\ 0.6 \cdot N \cdot B \cdot \frac{bd}{N \cdot bs + B \cdot t_{sint}}, & N > \frac{bd}{bs} \end{cases} \quad (2.18)$$

O valor máximo de vazão da rede que pode ser alcançado por um protocolo qualquer pode ser obtido como se segue. O *overhead* do tempo de sintonia é levado em consideração para cada pacote de dados, o que resulta em:

$$\gamma_1 = \frac{N \cdot B \cdot bd}{(bd + B \cdot t_{sint})} \quad (2.19)$$

Outro limite pode ser obtido pela taxa máxima na qual os endereços dos pacotes podem ser enviados (B/b_s) [8]. Portanto, a vazão da rede, neste caso, é:

$$\gamma_2 = \frac{B \cdot bd}{bs} \quad (2.20)$$

Combinando-se (2.19) e (2.20), tem-se:

$$\gamma \leq \begin{cases} N \cdot B \cdot \frac{bd}{bd + B \cdot t_{sint}}, & N \leq \frac{bd + B \cdot t_{sint}}{bs} \\ \frac{B \cdot bd}{bs}, & N > \frac{bd + B \cdot t_{sint}}{bs} \end{cases} \quad (2.21)$$

A Figura 2.10 esboça o limite de vazão da rede para um sistema ideal e para um sistema com o protocolo DT-WDMA. A máxima vazão de rede alcançada para um sistema com DT-WDMA é $0.6 \cdot B \cdot bd/b_s$ à medida que $N \rightarrow \infty$. Isto é 60 % do limite da vazão. A vazão

da rede com DT-WDMA aumenta linearmente com o número de nós até $N = bd/bs$. Depois deste ponto, os *mini-slots* passam a ter um comprimento maior que o tamanho dos pacotes, aumentando o *overhead*, e a vazão começa a saturar tendendo para o valor $0.6 \cdot B \cdot bd/bs$. Para redes com tamanhos de pacote pequenos, a eficiência do protocolo é reduzida devido ao aumento de *overhead*.

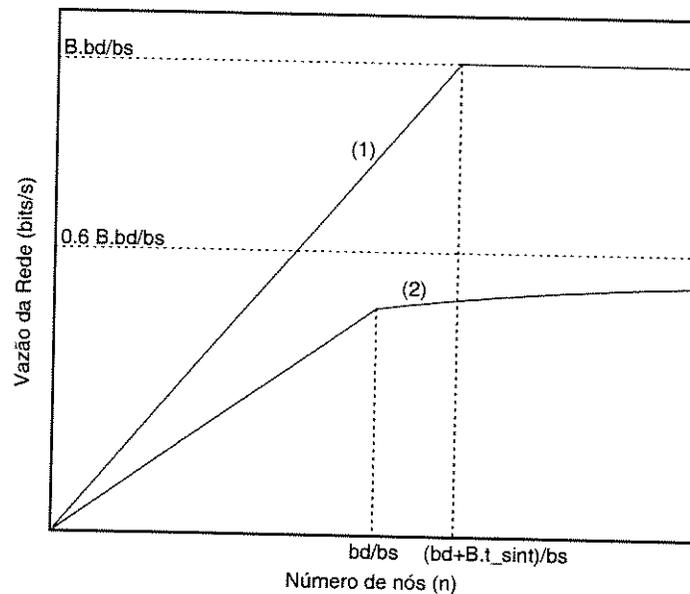


Figura 2.10 - Vazão máxima alcançada em função do número de nós, na topologia estrela. A curva (1) mostra a vazão da rede para um sistema ideal e a curva (2) mostra a vazão da rede utilizando-se o protocolo DT-WDMA.

2.3.3 Simulação

O programa de simulação para a rede estrela (*estrela.cpp*) foi feito em linguagem C++ e se encontra no Apêndice F.

A estação i conhece o resultado de sua transmissão depois de um atraso de $2d_i$ slots, sendo d_i a distância da estação i até o acoplador estrela. Com isso, o pacote deve ser armazenado no *buffer* da estação por, pelo menos, este período de tempo. Durante este período de espera, outros pacotes podem ser gerados e transmitidos. Utiliza-se, portanto, o tamanho do *buffer* de cada estação igual a $2d_i$.

Para análise da vazão, foi simulada uma rede com estações posicionadas 5 slots distantes do *hub* e com *buffers* de 10 slots de comprimento. A vazão versus a carga oferecida é mostrada na Figura 2.11 para N variando de 3 a 20. Em todos os casos a vazão aumenta linearmente com a carga oferecida até a saturação em um nível máximo. A vazão máxima por estação por slot decresce conforme N aumenta, mas converge em aproximadamente em 0.6. Portanto, a máxima vazão da rede em pacotes por slot para uma rede com N estações

equidistantes é dada por: $\gamma = 0.6N$. O valor da análise teórica ($\gamma = 0.63$) é ligeiramente maior do que o valor obtido nas simulações. Isto se deve à correlação entre transmissões em diferentes *slots* na simulação.

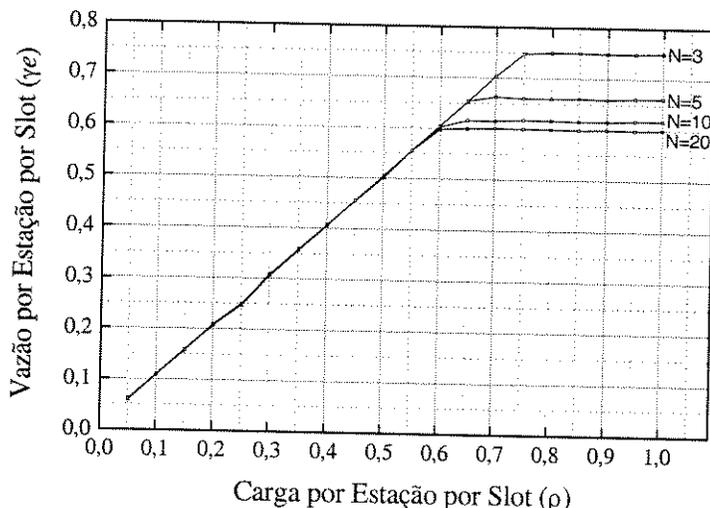


Figura 2.11 - Vazão por estação por *slot* versus carga oferecida por estação por *slot*, para diferentes números de estações, para uma rede na topologia estrela. Em todos os casos, o tamanho do *buffer* da estação é de 10 *slots* e todas as estações estão 5 *slots* distantes do *hub*.

A relação entre o atraso e a vazão pode ser vista na Figura 2.12. O número de estações é variado enquanto as estações são mantidas sempre 5 *slots* distantes do *hub* e o tamanho do *buffer* de cada estação de 10 *slots*. O gráfico é montado variando-se a carga oferecida ρ e medindo-se os valores correspondentes da vazão e atraso. Espera-se que o atraso aumente com o aumento da vazão, mas pode-se notar pela Figura 2.12 que para $\rho = 1$ o atraso é menor que para $\rho = 0.95$. Isto se deve à falta de fila demonstrada pelo protocolo para $\rho = 1$ e $q = 2d$. Neste caso, assim que o pacote é gerado, ele é bloqueado ou transmitido. Os pacotes não experimentam atraso de fila, somente os atrasos de propagação e retransmissão. Isto só é verificado para $q = 2d$ [7].

Outro resultado observado na Figura 2.12 é que a curva vazão \times atraso converge com o aumento do número de estações. Neste caso o atraso médio nunca é maior que 18 *slots*, dos quais são 8 *slots* em adição ao atraso de propagação do transmissor ao receptor.

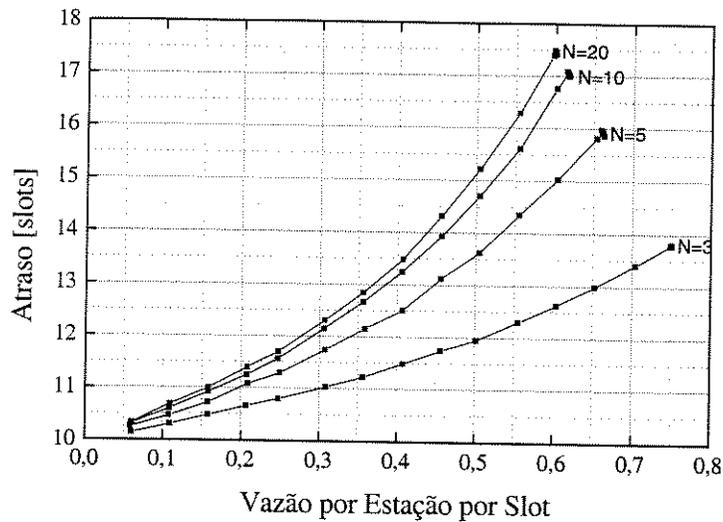


Figura 2.12 - Atraso médio por estação versus vazão por estação por *slot*, para diferentes números de estações, para uma rede na topologia estrela. Em todos os casos, todas as estações estão 5 *slots* distantes do *hub* e o tamanho do *buffer* de cada estação é de em 10 *slots*.

O algoritmo de arbitração permite que pacotes com atrasos maiores sejam transmitidos primeiro, estabelecendo uma prioridade maior para pacotes provenientes de estações mais distantes do *hub* (estações uniformemente distribuídas). Isto é feito porque estações mais próximas do *hub* podem retransmitir seus pacotes mais rapidamente, enquanto que pacotes de estações distantes que não atravessam na primeira tentativa experimentam um atraso total maior.

O protocolo DT-WDMA tem as seguintes vantagens:

1. É completamente descentralizado.
2. Não há necessidade de reconhecimentos explícitos porque os transmissores monitoram todos os *mini-slots* no comprimento de onda comum e utilizam uma regra de arbitração determinística comum para determinar o resultado de suas transmissões.
3. Devido aos reconhecimentos implícitos, o resultado de uma transmissão é conhecido do transmissor em um atraso de uma viagem de ida e volta do transmissor até o *hub*, ao invés do atraso maior de uma viagem de ida e volta do transmissor ao receptor. Então, o tempo entre transmissões é menor e o atraso do pacote é reduzido.
4. O receptor pode sempre receber uma de várias transmissões concorrentes em diferentes comprimentos de onda.
5. O protocolo suporta comutação híbrida. Estações no modo de comutação de circuitos anunciam seus *status* continuamente em um campo nos seus *mini-slots*. Utilizando estas informações, estações desistem de transmitir pacotes para os receptores que estão operando

- no modo de comutação de circuitos. A troca de informação de estabelecimento de circuito é transparente para o nível de controle de acesso ao meio.
6. O protocolo DT-WDMA provê um quadro flexível podendo-se incluir novas características à rede. Informações adicionais podem ser enviadas nos *mini-slots* de *status*, como por exemplo associar prioridades mais altas para certos tipos de tráfegos e determinadas estações. O algoritmo de arbitração pode ser modificado para tentar minimizar o atraso máximo de pacote ou agendar retransmissões dos pacotes de dados concorrentes de modo a evitar contenção.

Referências Bibliográficas

- [1] M.S. Goodman, H. Kobrinski, M.P. Vecchi, R.M. Bulley, J.L. Gimlett, "The lambdanet multiwavelength network: architecture, applications, and demonstrations", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.8, n° 6, pág. 995-1003, agosto 1990.
- [2] H. Kobrinski, R.M. Bulley, M.S. Goodman, M.P. Vecchi, C.A. Brackett, L. Curtis, J.L. Gimlett, "Demonstration of high capacity in the lambdanet architecture: a multiwavelength optical network", *Electronics Letters*, vol.23, n° 16, pág. 824-826, julho 1987.
- [3] E. Arthurs, J.M. Cooper, M.S. Goodman, H. Kobrinski, M. Tur, M.P. Vecchi, "Multiwavelength optical crossconnect for parallel-processing computers", *Electronics Letters*, vol.24, n° 2, pág. 119-120, janeiro de 1988.
- [4] E. Arthurs, M.S. Goodman, H. Kobrinski, M.P. Vecchi, "Hypass: an optoelectronic hybrid packet switching system", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.6, n° 9, pág. 1500-1509, dezembro 1988.
- [5] C. E. Brackett, "Dense wavelength division multiplexing networks: principles and applications", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.8, n° 6, pág. 948-964, agosto 1990.
- [6] M. S. Goodman, "Multiwavelength networks and new approaches to packet switching", *IEEE Communications Magazine*, pág. 27-35, outubro 1989.
- [7] M. S. Chen, N. R. Dono e R. Ramaswami, "A Media-Access Protocol for Packet-Switched Wavelength Division Multiaccess Metropolitan Area Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 8, no. 6, pág. 1048-1057, agosto 1990.
- [8] P. S. Henry, "High-capacity lightwave local area networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 27, pág. 20-26, outubro 1989.
- [9] P. R. Prucnal, M. A. Santoro e S. K. Sehgal, "Ultrafast all-optical synchronous multiple access fiber networks", *IEEE Journal on Select Areas in Communications*, vol. SAC-4, no. 9, pág. 1484-1493, dezembro 1986.
- [10] A. S. Acampora, "Shufflenet: An application of generalized perfect shuffles to multihop lightwave networks", *Globecom'87*, paper 37.5, pág. 1459-1467, novembro 1987.
- [11] D. J. G. Mestdagh, "Fundamentals of multiaccess optical fiber networks", Artech House, 1995.
- [12] B. Mukherjee, "WDM-based local lightwave networks part I: Single-hop systems", *IEEE Network*, pág. 12-27, maio 1992.

Capítulo 3

Redes WDMA na Topologia Anel

Neste capítulo são apresentadas as configurações anel de uma fibra e anel de várias fibras. Um estudo é feito sobre alguns fatores que limitam a capacidade máxima da rede para as duas configurações. Um protocolo de acesso ao meio é apresentado e um estudo de desempenho é realizado com ênfase na vazão e atraso médio da rede.

Este tipo de rede tem sido atualmente o mais implementado em redes ópticas, devido ao baixo custo e à facilidade de implementação, uma vez que pode interligar enlaces ponto-a-ponto já existentes.

A topologia anel requer que cada nó seja capaz de decidir se a informação deve ser retirada do anel ou simplesmente repassada para a estação seguinte. Isto inclui um pequeno atraso na mensagem, conhecido como latência do nó, que é o tempo que cada nó necessita para fazer a análise da informação. As redes na topologia anel podem fazer esta seleção de maneira ativa ou passiva. Nas redes ativas, o sinal é detectado em cada nó e a análise é feita na forma eletrônica. Nas redes passivas, o sinal é analisado na forma óptica. Quando uma mensagem é transmitida por uma estação, ela deve ser retirada do anel, após alcançar seu destino, para que não fique circulando indefinidamente no anel. A informação pode ser retirada do anel pelo nó transmissor ou pelo nó receptor.

Quando uma falha ocorre em alguma estação, um circuito de *bypass* (por exemplo, um comutador óptico) pode ser utilizado para retirar este nó da rede sem afetar o funcionamento do anel. Se a falha ocorre em alguma parte da fibra que interliga dois nós, o funcionamento da rede fica comprometido. Costuma-se utilizar, portanto, um segundo anel como *back-up*, para aumentar a confiabilidade da rede. Este segundo anel pode, também, carregar informações no sentido contrário ao do primeiro anel, dobrando a capacidade da rede e diminuindo o atraso médio de propagação. Se ocorre uma falha na fibra de um dos anéis, o outro anel continua funcionando normalmente, com metade da capacidade da rede. No caso de falhas serem

detectadas nas duas fibras na mesma localização da rede, elas pode ser “bypassadas” pelas estações adjacentes às falhas, criando-se um único anel e excluindo a área afetada. Se ocorrem falhas em dois pontos diferentes da fibra, uma seção da rede é isolada.

Numa rede passiva (sem regeneração do sinal) na topologia anel, o número de nós é limitado pela atenuação máxima que o sinal pode sofrer antes de chegar ao receptor destino, para uma determinada taxa de erro de bit (BER). Várias técnicas tem sido propostas para a utilização eficiente da potência óptica na rede anel. As perdas de potência nos acopladores passivos podem ser exploradas, utilizando-se reuso de comprimento de onda em diferentes porções do anel [5]. Uma rede óptica na topologia anel, utilizando circuito *add-drop*, é demonstrada em [4].

3.1 Anel de Uma Fibra

Um exemplo de rede na configuração anel de uma fibra é uma rede utilizando filtros ópticos com sintonia acústica independente de polarização (PIATOF) [2]. Este dispositivo é usado como um dispositivo *add-drop* para injetar a potência óptica no anel de fibra óptica e ao mesmo tempo retirar a potência restante do anel após uma volta completa, ao invés de se utilizar acopladores convencionais de 3 dB. Pode-se utilizar também a configuração anel de várias fibras, o que acarreta em um aumento adicional no número de nós da rede.

Em uma rede com N usuários, a configuração mais simples compreende de N dispositivos PIATOF com uma fibra monomodo passando de um nó para outro formando um anel (Figura 3.1). Nesta configuração, o número máximo de comprimentos de onda que podem ser selecionados simultaneamente, em cada nó, é limitado pela potência máxima de RF de alimentação que o dispositivo PIATOF pode manusear. Esta configuração pode ser modificada introduzindo-se acopladores passivos para habilitar os nós a acessar um número maior de comprimentos de onda (Figura 3.3). A configuração anel de várias fibras (Figura 3.5) consegue aumentar o número de usuários e, ainda, diminuir o número de comprimentos de onda operantes na rede. Na configuração da Figura 3.5, o número de usuários pode ser aumentado com o aumento do número de fibras até um limite determinado pela perda de inserção dos acopladores passivos.

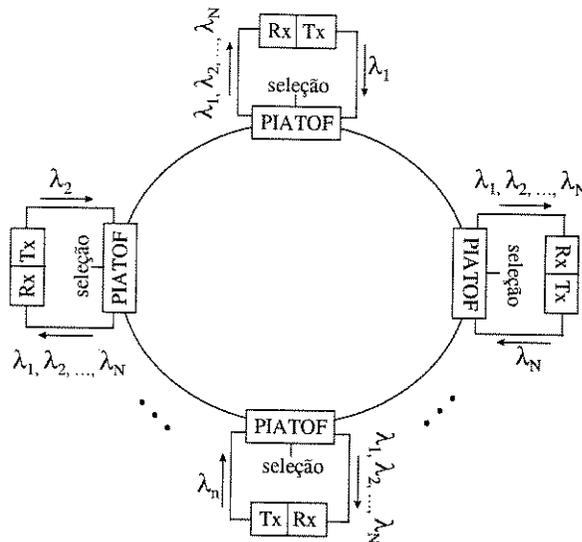


Figura 3.1- Rede WDMA na configuração anel de uma fibra, utilizando filtros com sintonia acústica independente de polarização (PIATOF's).

A rede da Figura 3.1 [1] é composta por um conjunto de N nós interligados por uma fibra monomodo formando um anel. Cada nó possui um único transmissor óptico fixo, um receptor óptico sintonizável e um filtro óptico com sintonia acústica independente de polarização (PIATOF). O PIATOF é utilizado como meio de injetar ou remover sinais ópticos da fibra em diferentes comprimentos de onda aplicando-se sinais de RF apropriados em sua entrada de seleção. Os sinais injetados no anel se propagam por uma volta completa antes de serem filtrados nos nós que os originaram. Isto é feito para impedir que os sinais se propaguem indefinidamente no anel e interfiram nas transmissões futuras. Cada seção de fibra suporta simultaneamente N sinais diferentes em N diferentes comprimentos de onda. Cada nó pode receber e processar informações dos demais nós simultaneamente e assincronamente. Esta configuração é apropriada para implementação de redes de difusão, pois oferece conectividade completa entre todos os nós.

Na Figura 3.1, o comprimento de onda do n -ésimo nó, λ_n , é injetado na fibra pela aplicação de um sinal de alimentação de RF com frequência f_n no PIATOF. A potência do sinal de RF deve ser grande o suficiente para acoplar todo sinal óptico de entrada na fibra. O sinal óptico injetado por um nó atravessará o anel por uma volta completa, oferecendo uma fração de sua potência para qualquer nó no caminho, e então a potência restante será filtrada pelo PIATOF do mesmo nó que a originou. Cada nó na rede pode acessar, simultaneamente, a transmissão de um ou mais nós aplicando-se ao PIATOF um ou mais sinais de RF com frequências correspondentes às dos comprimentos de onda desejados. A potência dos sinais de RF devem ser escolhidas de modo que o nó receba uma fração específica de potência dos diferentes sinais ópticos transmitidos. A porta de entrada inferior do PIATOF (Figura 3.2) é conectada à fibra proveniente do nó anterior e a porta de saída inferior é conectada à fibra

conectada ao nó seguinte. O nó injeta seu comprimento de onda λ_1 no anel via porta de entrada superior e retira sua transmissão prévia, a qual é denotada por λ_1' , via porta de saída superior.

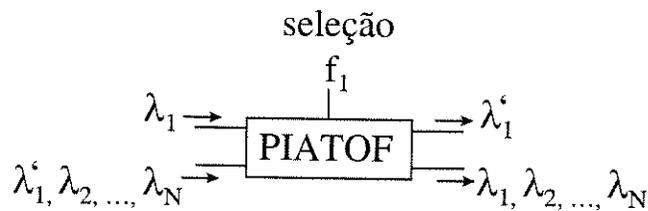


Figura 3.2 - Dispositivo PIATOF como um elemento *add-drop*.

Como todos os nós tem acesso aos N comprimentos de onda que trafegam na rede, a potência óptica transmitida por cada nó pode ser dividida igualmente entre os receptores dos N nós. Como diferentes nós no anel estão acessando a potência óptica transmitida por um dado nó, em sucessão, então, cada nó deve acessar N diferentes comprimentos de onda com N diferentes coeficientes de acoplamento para assegurar a distribuição uniforme da potência. Será definido o n -ésimo coeficiente de acoplamento, α_n , como a fração de potência acessada por um determinado nó da potência transmitida por outro nó, o qual está n posições antes dele. Como o sinal óptico, transmitido por um determinado nó, passa por diferentes nós ao longo da fibra, sua potência é reduzida por um fator $\beta_f (1 - \alpha_i)$ à medida que ele passa por cada nó, onde β_f leva em consideração a perda de inserção do filtro PIATOF. No n -ésimo nó, a potência retirada da fibra é dada por:

$$P_n = \alpha_n \beta_f^{n+1} \cdot (1 - \alpha_1) \cdot (1 - \alpha_2) \dots (1 - \alpha_{n-1}) \cdot P_T \quad (3.1)$$

onde $n = 1, 2, \dots, N$ e P_T é a potência óptica acoplada na fibra de entrada do PIATOF pelo nó transmissor. Para uma distribuição uniforme da potência entre os diferentes nós, tem-se:

$$P_1 = P_2 = \dots = P_N \quad (3.2)$$

Utilizando-se (3.1) e (3.2), os coeficientes de acoplamento podem ser encontrados por:

$$\alpha_n = \frac{\alpha_{n+1} \beta_f}{1 + \alpha_{n+1} \beta_f} \quad (3.3)$$

No n -ésimo nó (nó transmissor) toda a potência restante é retirada da fibra. Isto significa que $\alpha_n = 1$. Utilizando-se (3.3) e fazendo-se $\alpha_N = 1$, os coeficientes de acoplamento podem ser encontrados por:

$$\alpha_n = \frac{\beta_f^{N-n}}{1 + \beta_f + \beta_f^2 + \dots + \beta_f^{N-n}} \quad (3.4)$$

Para um filtro sem perdas ($\beta_f = 1$), a Equação (3.4) se reduz a:

$$\alpha_n = \frac{1}{N - n + 1} \quad (3.5)$$

Substituindo-se (3.4) em (3.1), a potência disponível na entrada de cada receptor, P_n , de um certo nó transmissor é dada por:

$$P_n = \beta_f^{N+1} \cdot \frac{1 - \beta_f}{1 - \beta_f^N} \cdot P_T \quad (3.6)$$

A mínima potência óptica requerida no receptor, P_R , é dada por:

$$P_R = h\nu \cdot n_p \cdot B \quad (3.7)$$

onde h é a constante de Planck, ν é a frequência da portadora óptica (em Hz) dada por c/λ , n_p é o número de fótons por bit requeridos no receptor e B é a taxa de bit (em bit/s) por estação. Igualando-se (3.6) à (3.7), a capacidade da rede, C , é dada por:

$$C = B \cdot N = N \cdot \beta_f^{N+1} \cdot \left(\frac{1 - \beta_f}{1 - \beta_f^N} \right) \cdot \frac{P_T}{h\nu \cdot n_p} \quad (3.8)$$

Para uma rede sem perdas ($\beta_f = 1$) o termo entre parênteses equivale a $1/N$, então, a capacidade máxima da rede na topologia anel da Figura 3.1 é dada por:

$$C_{max} = \frac{P_T}{h\nu \cdot n_p} \quad (3.9)$$

A capacidade de uma rede estrela, com N usuários, é dada por:

$$C_{estrela} = \beta_t^{\log_2 N} \cdot \left[\frac{P_T}{h\nu \cdot n_p} \right] \quad (3.10)$$

onde β_t leva em consideração as perdas em cada acoplador 2×2 que forma o acoplador estrela. Comparando-se (3.9) e (3.10) nota-se que, para redes sem perdas ($\beta_t = 1$), as redes anel e estrela tem a mesma capacidade máxima.

Na Figura 3.1, o número máximo de comprimentos de onda que podem simultaneamente ser selecionados em cada nó utilizando um único PIATOF é limitado à máxima potência de alimentação que o transdutor pode manusear. Portanto, esta configuração é apropriada para o caso onde cada nó é limitado a selecionar um pequeno número de comprimentos de onda. Este problema pode ser resolvido utilizando-se mais de um PIATOF no mesmo nó, mas tem a desvantagem de diminuir a capacidade da rede devido a perdas adicionais introduzidas pelos PIATOF's extras.

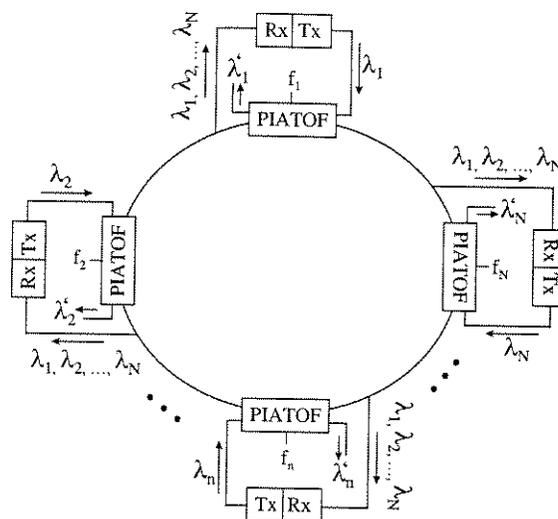


Figura 3.3- Rede WDMA na configuração anel de uma fibra, utilizando filtros com sintonia acústica independente de polarização (PIATOF's) e acopladores passivos.

Um método mais conveniente é utilizar acopladores passivos para acessar o anel, como mostra a Figura 3.3 [1]. Nesta rede, o PIATOF em cada nó é utilizado para injetar o comprimento de onda correspondente ao nó dentro do anel e remover a potência restante depois de uma volta completa. Portanto, somente um sinal de RF precisa ser aplicado ao PIATOF. O acoplador retira, em cada nó, uma pequena fração da potência total na fibra. O sinal na saída de cada acoplador contém todos os comprimentos de onda transmitidos por todos os nós na rede. Para acopladores com o mesmo coeficiente de acoplamento, as potências disponíveis dos diferentes comprimentos de onda são diferentes e elas dependem do número de nós que estes comprimentos de onda atravessam antes de alcançar o nó receptor. O nó localizado a uma posição anterior ao nó transmissor, o (N-1)-ésimo nó, receberá a menor potência óptica. Este valor de potência pode ser encontrado considerando-se as perdas sofridas pelo sinal à medida que ele atravessa o anel (Figura 3.3) do nó transmissor até o (N-1)-ésimo nó.

$$P_{N-1} = \alpha_t \cdot (1 - \alpha_t)^{N-1} \cdot (\beta_f \beta_t)^N \cdot P_T \quad (3.11)$$

onde α_t é o coeficiente do acoplador, β_f é a perda de inserção do PIATOF e β_t é o excesso de perda do acoplador. Para um dado N, existe um valor de α_t que maximiza o pior caso da potência disponível. Este $\alpha_{\text{ótimo}}$ pode ser encontrado diferenciando-se (3.11) com relação à α_t e igualando-se o resultado a zero. Tem-se, portanto:

$$\alpha_{\text{ótimo}} = \frac{1}{N} \quad (3.12)$$

Substituindo-se a (3.12) em (3.11) e igualando-se à fórmula da potência requerida pelo receptor (3.7), a capacidade da rede da Figura 3.3 é dada por:

$$C = \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{N-1} \cdot (\beta_f \beta_t)^N \cdot \left[\frac{P_T}{h\nu \cdot n_p} \right] \quad (3.13)$$

Para redes sem perdas ($\beta_t = \beta_f = 1$), a capacidade máxima da rede da Figura 3.3 se aproxima de:

$$C_{max} = \frac{1}{e} \cdot \left[\frac{P_T}{h\nu \cdot n_p} \right] \quad (3.14)$$

onde e é a constante exponencial ($e = 2.71828$). Pode-se notar em (3.14) que a capacidade máxima do anel mostrado na Figura 3.3 é $1/e$ vezes a do anel da Figura 3.1. Esta degradação é devido a distribuição não-uniforme, entre os diferentes nós, da potência transmitida.

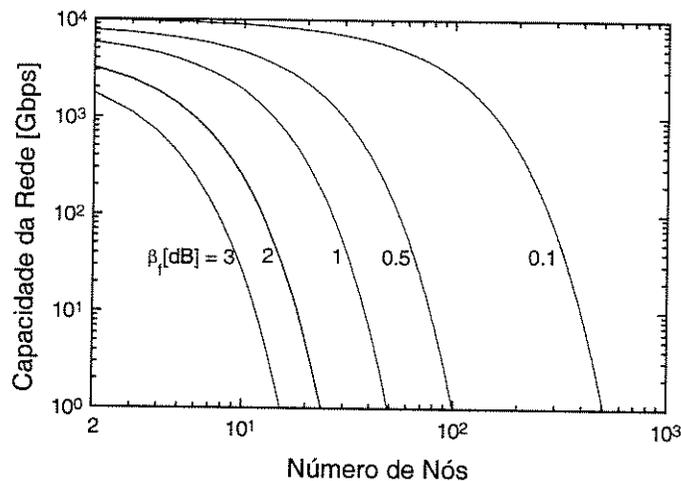


Figura 3.4 - Capacidade da rede em função do número de nós, em uma rede na configuração anel de uma fibra, para diferentes valores de perda de inserção do PIATOF.

A Figura 3.4 mostra a capacidade da rede dada por (3.8), para a rede anel mostrada na Figura 3.1, em função do número de usuários, para diferentes valores de β_f . Foram assumidos os seguintes valores: $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $P_T = 1 \text{ mW}$ e $n_p = 750$ fótons/bit. Na Figura 3.4, a curva com $\beta_f = 3 \text{ dB}$ pode representar, também, a capacidade da rede anel utilizando um acoplador passivo de 3 dB como um dispositivo *add-drop*, ao invés de um dispositivo PIATOF. Pode-se notar que, utilizando-se dispositivos PIATOF com perdas por inserção menores que 3 dB, o número de usuários que podem acessar a rede simultaneamente é maior. Como a perda de inserção total no anel aumenta linearmente com o número de nós, à medida que o número de nós aumenta, a capacidade das redes na topologia anel cai muito rapidamente, como pode ser visto na Figura 3.4. A capacidade em função do número de usuários para o anel mostrado na Figura 3.3 tem as mesmas características do anel mostrado na Figura 3.1, exceto que é menor por um fator de $1/e$. O número de usuários pode ser aumentado utilizando um anel de várias fibras.

3.2 Anel de Várias Fibras

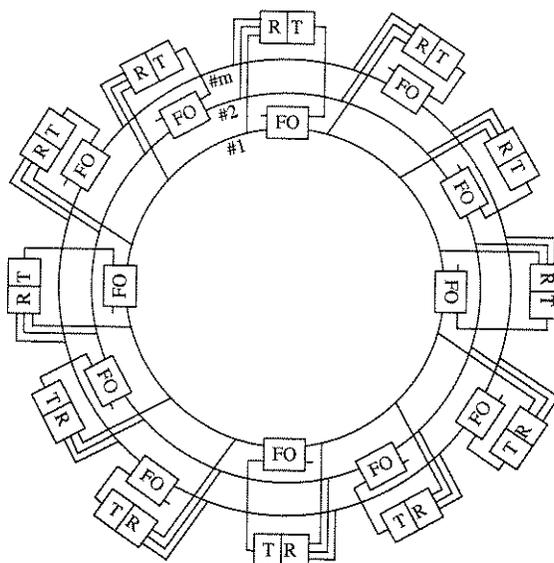


Figura 3.5 - Rede WDMA na configuração anel de várias fibras, utilizando PIATOF's e acopladores passivos.

Como o PIATOF tem uma perda de inserção relativamente alta ($\sim 2 - 3$ dB) comparada à perda do acoplador passivo (~ 0.1 dB), o número de usuários das redes anel passivas de uma fibra é limitado a algumas dezenas. Uma rede na configuração anel de várias fibras pode aumentar o número de usuários a algumas centenas. Sua configuração é mostrada na Figura 3.5 [1]. Nesta rede, os N usuários são divididos em m grupos com N/m usuários em cada grupo. Os usuários de cada grupo são interconectados utilizando-se uma configuração anel de uma fibra similar àquela da Figura 3.3, resultando em uma rede com m anéis. Cada usuário acessa os outros usuários da rede - dentro ou não do seu anel - através de acopladores passivos. Cada usuário da Figura 3.5 requer um PIATOF para injetar sua transmissão no anel correspondente e m acopladores passivos para acessar a transmissão dos N usuários. Deste modo, cada anel na rede contém N/m PIATOF's e N acopladores passivos. Na Figura 3.3 o sinal cada usuário passa por N PIATOF's e N acopladores passivos antes de ser filtrado, enquanto que na Figura 3.5 o sinal óptico passa por N/m PIATOF's e N acopladores passivos. Outra vantagem importante em usar anel de várias fibras é que somente N/m comprimentos de onda são necessários, para uma rede com N usuários. Este reuso de comprimento de onda é útil em redes WDMA densas, porque o número de comprimentos de onda disponível é limitado pela tecnologia.

Os comprimentos de onda que são designados para os N/m nós de cada anel são: $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N/m}$. Este mesmo conjunto de comprimentos de onda é reutilizado por outros grupos de usuários conectados nos demais anéis. A informação a ser transmitida modula um laser transmissor em um comprimento de onda pré-definido, λ_n , e a potência óptica de saída é acoplada ao anel de fibra óptica correspondente utilizando-se um dispositivo PIATOF, o qual

é sintonizado para λ_n aplicando-se um sinal de RF com frequência f_n à sua entrada de seleção. Ao mesmo tempo, este PIATOF é utilizado para retirar a potência óptica do sinal transmitido anteriormente no comprimento de onda λ_n , o qual é denotado por λ_n' , para evitar sua circulação indefinida no anel. Os comprimentos de onda restantes passarão pelo PIATOF sem modificação, exceto pela perda de inserção. Utilizando-se m acopladores passivos, este nó pode, simultaneamente, acessar a transmissão dos N nós da rede.

A capacidade da rede anel de várias fibras, mostrada na Figura 3.5, pode ser calculada similarmente à capacidade da Figura 3.3. A única diferença é que no cálculo do pior caso de potência disponível, o sinal óptico encontrará N/m PIATOF's, cada qual com perda de inserção β_f , e N acopladores passivos, cada qual com perda de inserção β_t , e um coeficiente de acoplamento α_t . Portanto, o pior caso de potência disponível no $(N-1)$ -ésimo nó, P_{N-1} , é dado por:

$$P_{N-1} = \alpha_t \cdot (1 - \alpha_t)^{N-1} \cdot \beta_t^N \cdot \beta_f^{N/m} \cdot P_T \quad (3.15)$$

Existe um valor ótimo de α_t que maximiza o pior caso de potência disponível para um dado número de usuários, e este valor é $\alpha_{\text{ótimo}} = 1/N$. Substituindo-se $\alpha_{\text{ótimo}}$ em (3.15) e igualando o resultado à potência recebida dada em (3.7), a capacidade da rede da Figura 3.5 é encontrada por:

$$C = \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{N-1} \cdot \beta_t^N \cdot \beta_f^{N/m} \cdot \left[\frac{P_T}{h\nu \cdot n_p} \right] \quad (3.16)$$

Pode-se notar em (3.16) que para um PIATOF com perdas ($\beta_f < 1$), a capacidade da rede pode ser aumentada aumentando-se o número de fibras, m , onde m pode ter valores de 1 a N . Para o caso de PIATOF sem perdas ($\beta_f = 1$), a capacidade é independente do número de fibras.

A equação (3.16) pode ser manipulada para encontrar o número mínimo de fibras necessário para suportar N usuários, cada um com uma taxa B [bps], utilizando-se (3.8).

$$m = N \cdot \frac{\log \beta_f}{\log \left(\frac{B \cdot N}{D \beta_t^N} \right)} \quad (3.17)$$

onde D é dado por:

$$D = \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{N-1} \cdot \left[\frac{P_T}{h\nu \cdot n_p} \right] \quad (3.18)$$

e esta equação representa a capacidade máxima para a rede da Figura 3.5, sem perdas.

Como o número de fibras é um inteiro, a quantidade de fibras utilizadas será o menor inteiro maior ou igual ao resultado de (3.17). Em (3.17), para dados valores de B , β_f , β_t e D , há um número máximo de usuários ativos que pode ser suportado pela rede da Figura 3.5. Como o numerador de (3.17) é sempre negativo ($\beta_f < 1$), m é positivo somente quando o denominador é negativo. Ou seja, $B \cdot N < D \beta_t^N$ e portanto o número máximo de usuários $N_{\text{máx}}$ é encontrado por:

$$\frac{N_{\text{máx}}}{\beta_{t\text{máx}}^N} = \frac{D}{B} \quad (3.19)$$

O lado direito de (3.19) representa o número máximo de usuários, cada qual com uma taxa de B [bps], suportado pela rede sem perdas.

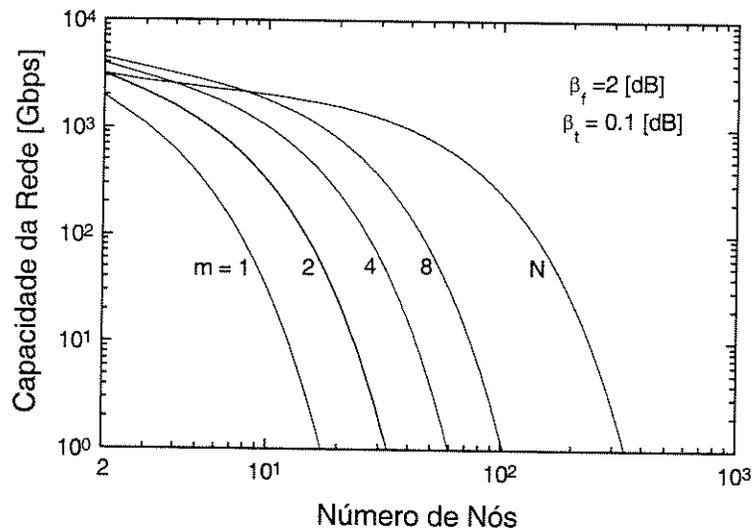


Figura 3.6 - Capacidade da rede em função do número de nós, em uma rede na configuração anel de várias fibras, para $\beta_f = 2$ dB e $\beta_t = 0.1$ dB.

Utilizando (3.16), a capacidade da rede anel com várias fibras em função do número de usuários (N) para diferentes números de fibras (m) é mostrado na Figura 3.6. A perda de inserção do PIATOF é assumida ser 2 dB, enquanto que a do acoplador passivo é 0.1 dB. Pode-se notar, pela Figura 3.6, que utilizando-se duas fibras obtém-se uma grande melhora na capacidade da rede comparada à rede de uma fibra. À medida que o número de fibras aumenta, a melhora na capacidade para cada fibra extra diminui, para $N < 10$.

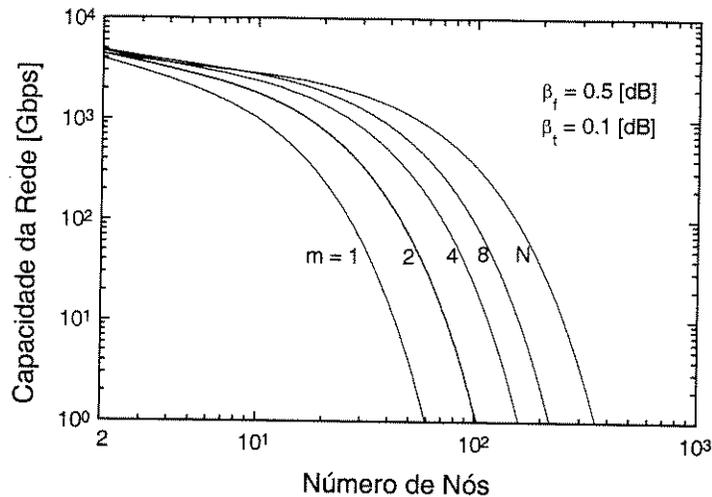


Figura 3.7 - Capacidade da rede em função do número de nós, em uma rede na configuração anel de várias fibras, para $\beta_f = 0.5$ dB e $\beta_t = 0.1$ dB.

Comparando-se as figuras 3.6 e 3.7, pode-se notar que, à medida que a perda de inserção do PIATOF diminui, as curvas para $m = 1$ e $m = N$ se tornam cada vez mais próximas, até que elas se tornam coincidentes para $\beta_f = 0$ dB.

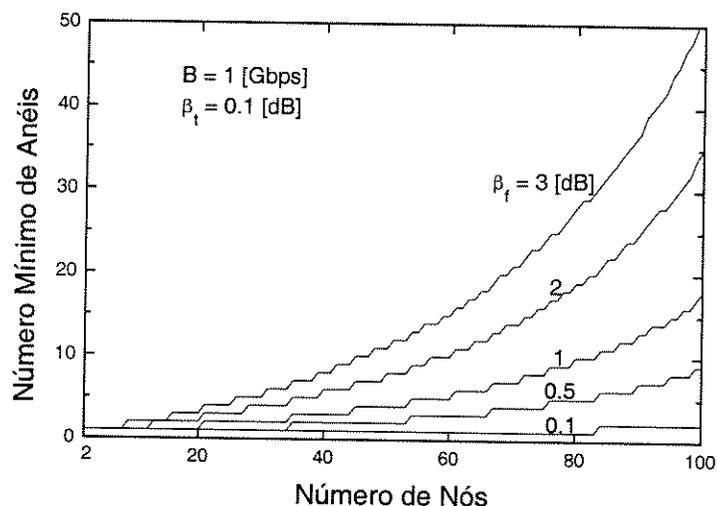


Figura 3.8 - Número mínimo de anéis necessários em função do número de nós, para diferentes valores de perda de inserção do PIATOF. A taxa de bit por usuário é 1 Gbps e a perda de inserção dos acopladores é de 0.1 dB.

O número mínimo de fibras necessárias em um anel de várias fibras para suportar um dado número de usuários cada um com uma taxa de 1 Gbps, para diferentes valores de perda de inserção do PIATOF é mostrado na Figura 3.8. Nota-se que quando a perda de inserção do PIATOF é igual à do acoplador, então uma única fibra é necessária e qualquer fibra extra é redundante. À medida que a perda de inserção do PIATOF aumenta, o número de fibras necessárias para suportar N usuários aumenta.

3.3 Protocolo de Acesso ao Meio

O protocolo a ser estudado, PIPELINE [10], utiliza a técnica WDMA para o transporte de dados e sub-portadoras para codificar a informação de controle. Com isso, a transmissão dos dados e da informação de controle é feita no mesmo comprimento de onda. Os dados são gerados na banda básica e a informação de controle é gerada na frequência de sub-portadora própria da estação, com isso, não são sobrepostos em frequência.

Cada nó possui um laser transmissor fixo e um receptor sintonizável. Os pacotes trafegam na forma óptica do nó fonte até o nó destino. O número de comprimentos de onda e de sub-portadoras utilizados na rede é igual ao número de nós. Os pacotes têm comprimento fixo e a transmissão ocorre em *slots*.

Sub-portadoras de controle com baixa taxa de transmissão são utilizadas para evitar que dois pacotes endereçados ao mesmo destinatário cheguem simultaneamente no receptor em canais de transmissão diferentes. O acesso às sub-portadoras de controle é baseado em *slots* que têm a mesma duração de tempo que os *slots* de dados. A informação contida nos sub-canais de controle é utilizada para informar ao receptor o comprimento de onda que ele deve sintonizar para receber o pacote endereçado a ele. A informação de controle do pacote é enviada juntamente com os dados no comprimento de onda do nó transmissor. Com isso, as sub-portadoras ficam espalhadas no espectro óptico. As sub-portadoras poderiam, ao invés disso, modular um comprimento de onda comum, compartilhado por todos os nós. Isso exigiria de cada nó um transmissor fixo adicional, sintonizado no comprimento de onda de controle, e o detector de cabeçalho deveria ser substituído por um receptor óptico fixo. Mas tal mudança acarretaria um aumento do custo da rede.

O receptor é formado por um detector de cabeçalho, um processador de canal de controle, um seletor de comprimento de onda sintonizável, um fotodetector e linhas de atraso (ver Figuras 3.9 e 3.10). O detector de cabeçalho consiste de um fotodetector, utilizado para retirar as informações de controle e um filtro passa-faixa eletrônico. O fotodetector passa para a forma elétrica todo o sinal contido na rede. Com isso, todos os pacotes que estavam na banda base em diferentes comprimentos de onda serão sobrepostos, mas as frequências de sub-portadora estarão distintas no espectro de frequência. Utiliza-se, então, o filtro passa-faixa eletrônico para se retirar a frequência de sub-portadora correspondente àquele nó. A informação de controle, após passar pelo processador de canal de controle, informa o seletor de comprimento de onda sobre qual comprimento de onda ele deve sintonizar. O seletor de comprimento de onda extrai da fibra somente os pacotes endereçados ao nó. Os outros pacotes passam pelo anel sem sofrer qualquer alteração. O seletor de comprimento de onda pode ser

implementado utilizando-se, por exemplo, filtros sintonizáveis acusto-ópticos [2] com tempo de comutação comparável à duração do pacote. Como as informações de controle e os pacotes de dados são enviados simultaneamente, as linhas de atraso inserem um pequeno atraso nos pacotes, para que o seletor de comprimento de onda já esteja sintonizado quando o pacote endereçado ao nó passar por ele. O pacote de dados é retirado no *slot* de tempo seguinte à sintonia do seletor. A informação de controle pode ser transmitida antes do pacote de dados, evitando a necessidade de uma linha de atraso.

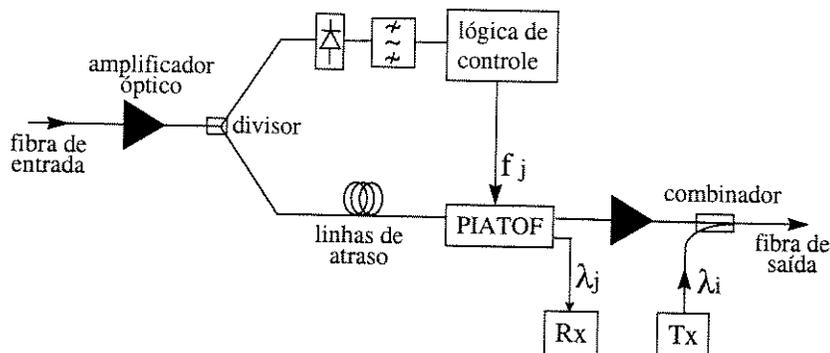


Figura 3.9 - Representação de um nó da rede, com a informação sendo retirada do anel pelo nó destino.

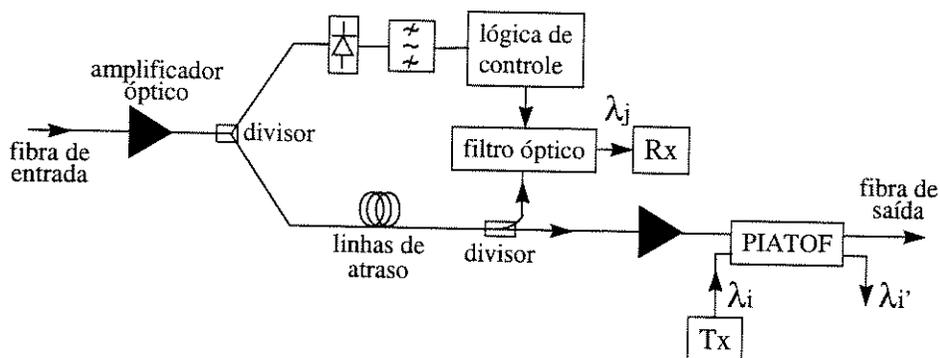


Figura 3.10 - Representação de um nó da rede, com a informação sendo retirada do anel pelo nó transmissor.

3.3.1 Descrição do Protocolo

O protocolo PIPELINE [10] é proposto para redes de comutação de pacotes na configuração em anel de uma fibra. Um exemplo de rede anel com codificação do cabeçalho por sub-portadoras é mostrado em [3]. Neste exemplo, contenções no receptor podem ocorrer. PIPELINE, ao invés disto, adota um mecanismo de sensor na transmissão que evita a contenção no receptor.

Este protocolo possui as seguintes vantagens:

- nenhuma colisão de pacote ocorre na transmissão porque cada nó tem seu próprio comprimento de onda;
- não há problemas na ordenação dos pacotes, uma vez que pacotes não podem ser ultrapassados por outros pacotes enviados pelo mesmo nó;

- nenhum pacote é perdido na rede;
- não há contenções no receptor.

Cada nó deve saber se os pacotes que estão chegando, em diferentes comprimentos de onda, devem ser removidos do anel ou devem ser deixados seguir adiante para o próximo nó. Isto é resolvido utilizando a técnica de codificação-decodificação de cabeçalho do pacote com Sinalização por Múltiplas Sub-portadoras (MSS). O cabeçalho e os pacotes de dados tem a mesma duração de tempo, sendo que a sub-portadora codifica a informação do cabeçalho do pacote em baixas taxas de bit, e o pacote é transmitido em banda básica em alta velocidade.

São utilizadas N frequências de sub-portadoras para endereçar N nós na rede. Quando uma estação qualquer quer transmitir um pacote, ela codifica a informação de cabeçalho do pacote utilizando a frequência de sub-portadora do destino (s_j) e transmite o pacote utilizando seu comprimento de onda fixo λ_i . A frequência de sub-portadora s_j é reservada para cabeçalhos de pacotes endereçados para o nó j , independe do nó de envio. Cada nó retira uma fração da luz do anel e alimenta seu detector de cabeçalho. Um nó toma conhecimento de um pacote endereçado a ele pela checagem contínua da presença da sua frequência de sub-portadora no detector de cabeçalho. A informação de controle codificada na sub-portadora informa à estação em qual comprimento de onda o pacote endereçado a ela está disponível.

Depois do divisor alimentar o detector de cabeçalho o sinal de luz do anel atravessa uma linha de atraso, para dar tempo da lógica de controle do nó reagir e sintonizar o receptor no comprimento de onda do pacote que está chegando endereçado a ele (ver Figuras 3.9 e 3.10).

Contenções ocorrem se dois ou mais pacotes, enviados para o mesmo nó, entram naquele nó, ao mesmo tempo, em diferentes comprimentos de onda. Este problema é tratado da seguinte forma: antes de uma estação enviar um pacote para um determinado destino, ela utiliza seu detector de cabeçalho para saber se outros pacotes, endereçados para este mesmo destino, estão passando por ali naquele instante. Isto é feito monitorando-se a presença da sub-portadora da estação destino. Somente quando a estação está certa de que nenhum pacote para o seu destino está passando na fibra, então ela envia seu próprio pacote. Deste modo, pacotes para o mesmo destino não se sobrepõem na estação transmissora. Uma vez que todos os pacotes viajam na mesma fibra, isto é suficiente para assegurar que sobreposição de pacotes endereçados para o mesmo destino não vão acontecer na estação transmissora (considerando-se a dispersão de comprimento de onda desprezível). Com isso, a contenção no receptor é completamente evitada.

Como não há colisões na rede, o pacote de dados é retirado na recepção ou no nó transmissor após uma volta. Isto impede que o sinal trafegue indefinidamente no anel e ainda evita interferências com um novo sinal inserido no anel, no mesmo comprimento de onda.

3.3.2 Simulação

O programa de simulação para a rede anel (`anel.cpp`) foi feito em linguagem C++ e encontra-se no Apêndice G.

Na simulação, leva-se em consideração uma rede com N nós, distribuídos uniformemente no anel. Os pacotes são gerados em cada estação transmissora por um processo de Bernoulli independente. Um pacote é gerado em cada estação com probabilidade $p = \rho$ em cada *slot*, onde ρ é a carga oferecida por estação. Foi assumido tráfego uniforme, isto é, um pacote é transmitido com igual probabilidade para qualquer um dos $N-1$ nós restantes.

Os parâmetros de entrada do programa são:

1. Número de nós;
2. O tempo de simulação;
3. Distância entre os nós;
4. Taxa de transmissão por estação;
5. Tamanho do pacote de dados;
6. Razão entre o pacote de dados e o pacote de controle;
7. Tempo de sintonia do filtro.

E os parâmetros de saída:

1. Vazão (γ): número de pacotes transmitidos com sucesso por *slot* na rede (γ_e é a vazão por estação por *slot*);
2. Atraso médio (D): média dos intervalos entre os instantes de geração e de recepção do pacote.

Podem ser feitas duas análises para simulação. Na primeira análise, considera-se que o sinal é retirado do anel pela estação transmissora. Na segunda análise considera-se que o sinal é retirado do anel pela estação receptora, não chegando a completar uma volta no anel. Sabe-se intuitivamente que pode-se obter uma vazão de rede maior na segunda análise.

Uma simulação foi feita para visualizar como a vazão se comporta com o aumento do número de nós, para os dois casos. A rede simulada tem os nós posicionados 5 *slots* distantes uma da outra. O *buffer* da estação, que armazena os pacotes gerados até eles serem transmitidos, tem um comprimento de 150 *slots*. A vazão versus a carga oferecida é mostrada

na Figura 3.11 para N variando de 3 a 20. Em todos os valores de N , a vazão aumenta linearmente com a carga oferecida até a saturação em um nível máximo. A vazão máxima por estação por *slot* decresce com o aumento de N , mas converge em aproximadamente em 0.48. Como previsto, a vazão para o 2º caso é maior. O valor máximo de vazão aumenta para 0.6, como mostra a Figura 3.12.

A relação entre o atraso e a vazão, para os dois casos, pode ser vista na Figura 3.13. O gráfico é montado variando-se a carga oferecida ρ e medindo-se os valores correspondentes da vazão e atraso. Pode-se notar, pela Figura 3.13, que o atraso não varia com o aumento da vazão. E este valor de atraso é de 2 *slots* acima do atraso de propagação médio na fibra [9].

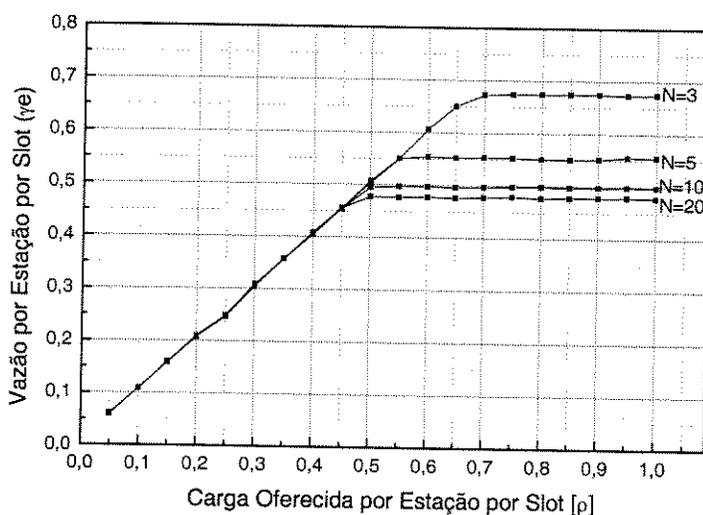


Figura 3.11 - Vazão por estação por *slot* versus carga oferecida por estação por *slot*, para diferentes números de estações, para uma rede na configuração anel de uma fibra, com a informação retirada do anel após uma volta completa.

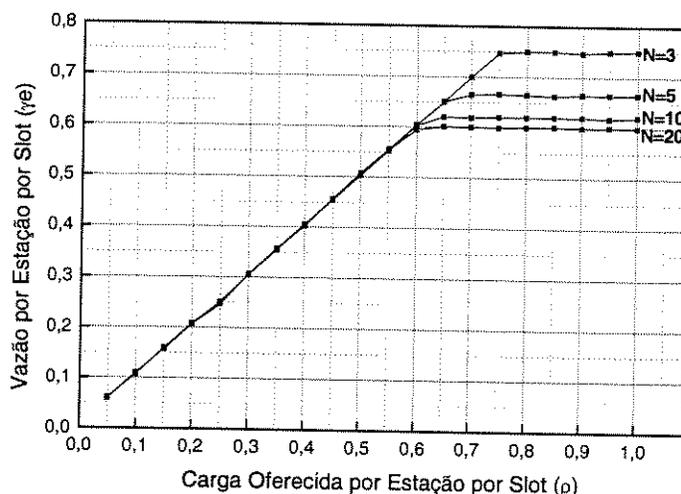


Figura 3.12 - Vazão por estação por *slot* versus carga oferecida por estação por *slot*, para diferentes números de estações, para uma rede na configuração anel de uma fibra, com a informação retirada do anel pela estação destino.

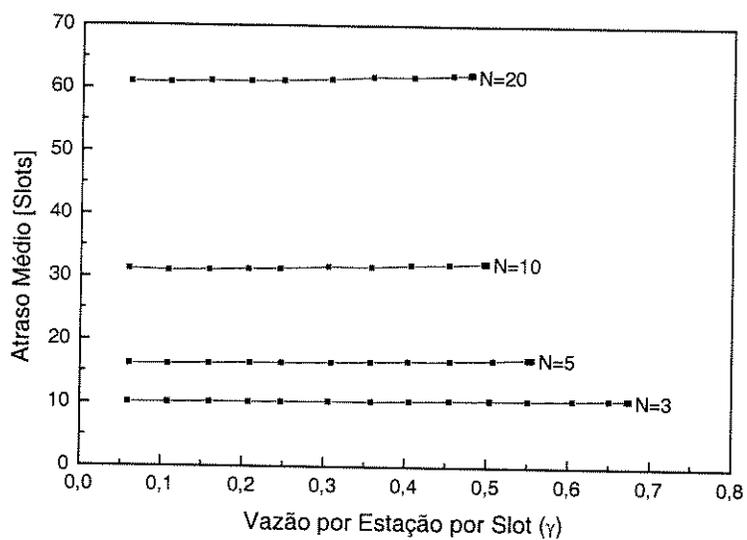


Figura 3.13 - Atraso médio por estação versus vazão por estação por *slot* para os dois casos: 1) pacotes sendo retirados do anel, após uma volta completa, pela estação transmissora e 2) pacotes sendo retirados do anel pela estação destino.

Referências Bibliográficas

- [1] M.I. Irshid, M. Kavehrad, "A fully transparent fiber-optic ring architecture for wdm networks", *Journal of Lighthwave Technology*, vol. 10, no. 1, pág. 101-108, janeiro 1992.
- [2] D.A. Smith, J.E. Baran, J.J. Johnson e K.W. Cheung, "Integrated-optic acoustically-tunable filters for wdm networks", *IEEE Journal on Select Areas Communications*, vol.8, no.6, pág. 1015-1025, agosto 1990.
- [3] S. F. Su, R. Olshansky, "Performance of wdma networks with baseband data packets and subcarrier multiplexed control channels", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 5, no. 2, pág. 236-239, fevereiro 1993.
- [4] B. Glance, C. R. Doerr, I. P. Kaminow, R. Montagne, "Optically restorable wdm ring network using simple add/drop circuitry", *Journal of Lighthwave Technology*, vol. 14, no. 11, pág. 2453-2456, novembro 1996.
- [5] M.J. Karol, "Exploiting the attenuation of fiber-optic passive taps to create large high-capacitu LAN's and MAN's", *Proc. 1990 Conf. On Information Sciences and Systems*, Princeton University, março 1990.
- [6] L. F. G. Soares, G. Lemos, S. Colcher, "Redes de Computadores - Das LAN's, MAN's e WAN's às Redes ATM", Segunda Edição, Editora Campus, 1995.
- [7] A. S. Tanenbaum, "Computer Networks", Terceira Edição, Prentice Hall, 1996.
- [8] W. F. Giozza, E. Conforti, H. Waldman, "Fibras Ópticas - Tecnologia e Projeto de Sistemas", Makron Books e McGraw-Hill, 1991.
- [9] O. K. Tonguz, K. A. Falcone, "Fiber -optic interconnection of local area networks: physical limitations of topologies", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, no. 5/6, pág. 1040-1052, maio/junho 1993.
- [10] I. Chlamtac, A. Fumagalli, P. T. Poggiolini, L. G. Kazovsky, "A multi-gbit/s wdm optical packet network with physical ring topology and multi-subcarrier header encoding", *Proc. ECOC'93, Montreux, Part 2*, pág. 121-124, 1993.

Conclusão

Este trabalho procurou fazer um estudo sobre o desempenho de redes de difusão que utilizam acesso múltiplo por divisão de comprimento de onda (WDMA). Foi realizada uma análise de várias topologias de rede como: estrela, anel, anel duplo, barramento dobrado e barramento duplo. A rede estrela demonstrou ser muito atrativa para redes que exigem pequeno atraso de propagação, sendo portanto a topologia mais adequada para redes de alta velocidade. Redes de difusão na topologia estrela tem sido largamente utilizadas, mas devido ao desperdício de potência, redes com roteamento de comprimento de onda começam a despertar interesse. Mas este tipo de rede depende ainda do avanço da tecnologia de dispositivos tais como as conexões cruzadas ópticas. A rede estrela tem a desvantagem de requerer a maior quantidade de fibra. A rede na topologia anel é a que utiliza menor quantidade de fibra. Esta rede é de fácil implementação, podendo-se interligar enlaces ponto-a-ponto já existentes, formando o anel. Esta rede é atrativa quando o custo é um fator decisivo no projeto. Contudo, as redes na topologia anel tem baixa confiabilidade, uma vez que a ruptura do anel compromete toda a rede. Isto pode ser solucionado com o uso de um anel duplo com configuração restaurável no caso de falhas. O segundo anel pode, além disso, carregar informações na direção contrária à do primeiro anel, dobrando a capacidade da rede e diminuindo o atraso de propagação. A rede na topologia barramento, apesar de extremamente utilizada em redes locais com cabo de cobre, não é uma solução muito atrativa para redes ópticas uma vez que apresenta alto custo com acopladores (um para cada barramento), grande perda de potência (a perda por inserção cresce linearmente com o número de nós, enquanto que na estrela cresce logaritmicamente com o número de nós) e confiabilidade de rede comparável a rede de um anel. Foram levados em consideração somente sistemas sem amplificação óptica.

Na camada de enlace, foram analisados protocolos de acesso ao meio para redes nas topologias estrela e anel. Foram escolhidos para simulação protocolos que obtivessem alta vazão, sem comprometer o atraso da rede. Dois esquemas híbridos foram escolhidos, pois podem obter melhores resultados aproveitando-se a vantagem de cada tecnologia. O protocolo DT-WDMA foi escolhido para a rede estrela. Uma vazão máxima de 0.6 foi obtida com a

simulação do protocolo para um grande número de nós. O atraso de propagação encontrado foi de 8 *slots* acima do atraso de propagação do sinal na fibra do transmissor até o receptor. O atraso médio da rede pode ser diminuído com a utilização de *buffers* nos receptores diminuindo-se, assim, o número de retransmissões na rede. O protocolo PIPELINE foi escolhido para a rede anel. A vazão alcançada foi de 0.48 quando a informação é retirada do anel pelo nó transmissor. Mas esta vazão pôde ser melhorada com a retirada da informação pelo nó destino, alcançando desempenho semelhante à rede estrela. O atraso médio de propagação obtido é de 2 *slots* acima do atraso de propagação do sinal na fibra da fonte até o destino.

Tem-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Estudo das topologias físicas, considerando-se o uso de amplificação óptica;
- Análise da topologia estrela com roteamento de comprimento de onda;
- Análise de tráfego não-uniforme nas simulações;
- Análise dos protocolos considerando-se estações não-equidistantes.

Apêndice A

Cálculos de Atenuação

A.1 Cálculos da atenuação do sinal óptico, provocada pelos acopladores ópticos na rede, para as diversas topologias

A.1.1 Cálculo da atenuação para a topologia Estrela

Supondo uma rede estrela que utiliza acopladores direcionais de 3 dB para formar o acoplador estrela, esta rede utiliza $\frac{N}{2} \cdot \log_2 N$ acopladores direcionais para formar uma estrela $N \times N$ [1]. Contudo, o sinal transmitido por um nó qualquer passa somente por $\log_2 N$ acopladores para atingir o seu destino [1]. Com isso, a atenuação do sinal provocada pelos acopladores ópticos, para a rede estrela, é dada por:

$$A_{estrela} = \alpha_t \cdot \beta_t^{\log_2 N} \quad (A.1)$$

onde N é o número de nós, β_t é o excesso de perda do acoplador e α_t é o coeficiente de acoplamento. Utilizando-se um acoplador estrela $N \times N$, formado por acopladores de 3 dB, tem-se $\alpha_t = 1/N$, ou seja, uma fração de $1/N$ da potência de entrada está disponível em cada uma das suas fibras de saída [1]. Com isso, a fórmula da atenuação para a rede estrela é dada por:

$$A_{estrela} = \frac{\beta_t^{\log_2 N}}{N} \quad (A.2)$$

A.1.2 Cálculo da atenuação para a topologia Anel Simples

Sabe-se que o coeficiente de acoplamento é igual a α_t . Portanto, a parcela de potência inserida no anel pelo nó transmissor e a parcela de potência retirada do anel pelo nó receptor

são iguais a α_t . Nos nós intermediários, entre os nós transmissor e receptor, o sinal sofre uma atenuação de $(1-\alpha_t)$.

A seguir são apresentados os valores de atenuação, para redes na configuração anel simples, com 3, 4 e 5 nós, deduzindo-se, à partir destes valores, a fórmula geral para uma rede com N nós.

$$\text{Para 3 nós: } A = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t) \cdot \beta_t^3$$

$$\text{Para 4 nós: } A = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t)^2 \cdot \beta_t^4$$

$$\text{Para 5 nós: } A = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t)^3 \cdot \beta_t^5$$

$$\text{Para N nós: } A = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t)^{N-2} \cdot \beta_t^N$$

Tem-se, portanto, que para a rede anel simples, a atenuação é dada por:

$$A_{\text{anel simples}} = \alpha^2 \cdot (1 - \alpha)^{N-2} \cdot \beta_t^N \quad (\text{A.3})$$

O valor ótimo de α_t , para que a atenuação seja mínima, é encontrado derivando-se a equação (A.3) e igualando-a a zero. Com isso, encontra-se que $\alpha_t = 2/N$. Substituindo o valor encontrado de α_t em (A.3), tem-se:

$$A_{\text{anel simples}} = \frac{4}{N^2} \cdot \left(1 - \frac{2}{N}\right)^{N-2} \cdot \beta_t^N \quad (\text{A.4})$$

A.1.3 Cálculo da atenuação para a topologia Anel Duplo

A seguir são apresentados os valores de atenuação, para redes na configuração anel duplo, com 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 nós.

$$\text{Para 3 nós: } A = \alpha_t^2 \cdot \beta_t^2$$

$$\text{Para 4 nós: } A = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t) \cdot \beta_t^3$$

$$\text{Para 5 nós: } A = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t) \cdot \beta_t^3$$

$$\text{Para 6 nós: } A = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t)^2 \cdot \beta_t^4$$

$$\text{Para 7 nós: } A = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t)^2 \cdot \beta_t^4$$

$$\text{Para 8 nós: } A = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t)^3 \cdot \beta_t^5$$

$$\text{Para 9 nós: } A = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t)^3 \cdot \beta_t^5$$

À partir destes valores, pode-se encontrar as fórmulas gerais para redes anel duplo com número par e número ímpar de nós.

$$\text{Para N par: } A = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t)^{\frac{N-2}{2}} \cdot \beta_t^{\frac{N+2}{2}}$$

Para N ímpar: $A = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t)^{\frac{N-3}{2}} \cdot \beta_t^{\frac{N+1}{2}}$

Tem-se, portanto, que para a rede anel duplo, a atenuação é dada por:

$$A_{anel\ duplo} = \begin{cases} \alpha^2 \cdot (1 - \alpha)^{\frac{N-2}{2}} \cdot (\beta_t)^{\frac{N+2}{2}} & \text{para } N \text{ par} \\ \alpha^2 \cdot (1 - \alpha)^{\frac{N-3}{2}} \cdot (\beta_t)^{\frac{N+1}{2}} & \text{para } N \text{ ímpar} \end{cases} \quad (A.5)$$

Os valores ótimos de α_t , para que a atenuação seja mínima, são encontrados derivando-se as equações (A.5), para N par e N ímpar, e igualando-as a zero. Com isso, encontra-se que $\alpha_t = 4/(N+2)$ para N par e $\alpha_t = 4/(N+1)$ para N ímpar. Substituindo os valores encontrados de α_t em (A.5), tem-se:

$$A_{anel\ duplo} = \begin{cases} \frac{16}{(N+2)^2} \cdot \left(1 - \frac{4}{(N+2)}\right)^{\frac{N-2}{2}} \cdot (\beta_t)^{\frac{N+2}{2}} & \text{para } N \text{ par} \\ \frac{16}{(N+1)^2} \cdot \left(1 - \frac{4}{(N+1)}\right)^{\frac{N-3}{2}} \cdot (\beta_t)^{\frac{N+1}{2}} & \text{para } N \text{ ímpar} \end{cases} \quad (A.6)$$

É utilizada a fórmula para N ímpar, no Capítulo 1, uma vez que o menor anel é formado por 3 nós.

A.1.4 Cálculo da atenuação para a topologia Barramento Duplo

A seguir são apresentados os valores de atenuação, para redes na configuração barramento duplo, com 3, 4 e 5 nós, deduzindo-se, à partir destes valores, a fórmula geral para uma rede com N nós.

Para 3 nós: $A = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t) \cdot \beta_t^3$

Para 4 nós: $A = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t)^2 \cdot \beta_t^4$

Para 5 nós: $A = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t)^3 \cdot \beta_t^5$

Para N nós: $A = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t)^{N-2} \cdot \beta_t^N$

Tem-se, portanto, que para a rede barramento duplo, a atenuação é dada por:

$$A_{bar.\ duplo} = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t)^{N-2} \cdot \beta_t^N \quad (A.7)$$

O valor ótimo de α_t , para que a atenuação seja mínima, é encontrado derivando-se a equação (A.7) e igualando-a a zero. Com isso, encontra-se que $\alpha_t = 2/N$. Substituindo o valor encontrado de α_t em (A.7), tem-se:

$$A_{bar.\ duplo} = \frac{4}{N^2} \cdot \left(1 - \frac{2}{N}\right)^{N-2} \cdot \beta_t^N \quad (A.8)$$

A.1.5 Cálculo da atenuação para a topologia Barramento Dobrado

A seguir são apresentados os valores de atenuação, para redes na configuração barramento dobrado, com 3, 4 e 5 nós, deduzindo-se, à partir destes valores, a fórmula geral para uma rede com N nós.

$$\text{Para 3 nós: } A = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t)^3 \cdot \beta_t^5$$

$$\text{Para 4 nós: } A = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t)^5 \cdot \beta_t^7$$

$$\text{Para 5 nós: } A = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t)^7 \cdot \beta_t^9$$

$$\text{Para N nós: } A = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t)^{2N-3} \cdot \beta_t^{2N-1}$$

Tem-se, portanto, que para a rede barramento dobrado, a atenuação é dada por:

$$A_{bar.dobrado} = \alpha_t^2 \cdot (1 - \alpha_t)^{2N-3} \cdot \beta_t^{2N-1} \quad (A.9)$$

O valor ótimo de α_t , para que a atenuação seja mínima, é encontrado derivando-se a equação (A.9) e igualando-a a zero. Com isso, encontra-se que $\alpha_t = 2/(2N-1)$. Substituindo o valor encontrado de α_t em (A.9), tem-se:

$$A_{bar.dobrado} = \frac{4}{(2N-1)^2} \cdot \left(1 - \frac{2}{(2N-1)}\right)^{2N-3} \cdot \beta_t^{2N-1} \quad (A.10)$$

Referências Bibliográficas

- [1] P. Green, "Fiber Optic Networks", Prentice Hall, 1993.

Apêndice B

Cálculos de Atraso

B.1 Cálculos do Atraso médio de propagação para as diversas topologias

B.1.1 Cálculo do atraso médio de propagação para a topologia Anel Simples

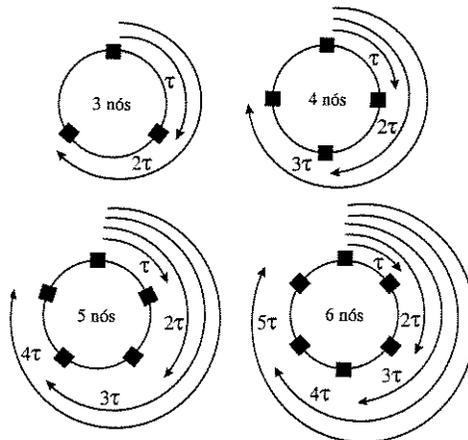


Figura B.1 - Atrasos de propagação de um determinado nó para os demais nós da rede, para redes anel simples com 3,4,5 e 6 nós e propagação da informação no sentido horário.

Como a distância entre nós é constante, pode-se fazer a análise escolhendo-se um nó e o atraso médio obtido será o atraso médio de propagação entre 2 nós quaisquer na rede. O atraso de propagação médio pode ser obtido dividindo-se a soma dos tempos de propagação de um determinado nó para todos os outros nós pelo número de nós para o qual este nó pode transmitir, ou seja $(N-1)$ nós.

Da Figura B.1, tira-se os valores de atraso para redes com 3, 4, 5 e 6 nós, e à partir destes valores, pode-se deduzir a fórmula para uma rede com N nós.

$$\text{Para 3 nós: } \bar{\tau} = \frac{\tau + 2\tau}{2} = \frac{3}{2}\tau$$

$$\text{Para 4 nós: } \bar{\tau} = \frac{\tau + 2\tau + 3\tau}{3} = 2\tau$$

$$\text{Para 5 nós: } \bar{\tau} = \frac{\tau + 2\tau + 3\tau + 4\tau}{4} = \frac{5}{2}\tau$$

$$\text{Para 6 nós: } \bar{\tau} = \frac{\tau + 2\tau + 3\tau + 4\tau + 5\tau}{5} = 3\tau$$

A fórmula geral para o atraso médio entre nós, para a rede anel simples, é dada por:

$$\bar{\tau}_{\text{anel simples}} = \frac{N}{2}\tau \quad (\text{B.1})$$

onde τ é o atraso entre nós adjacentes.

B.1.2 Cálculo do atraso médio de propagação para a topologia Anel Duplo

Considera-se que o anel duplo tem suas fibras transmitindo em sentidos opostos.

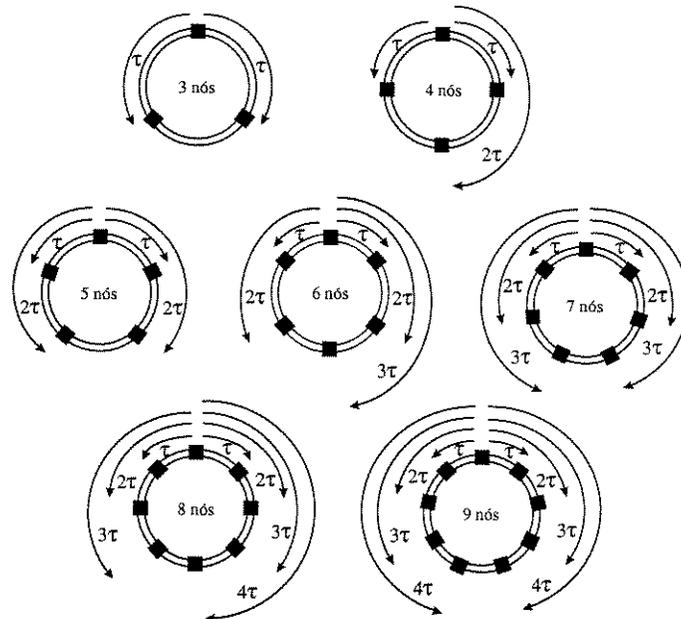


Figura B.2 - Atrasos de propagação de um determinado nó para os demais nós da rede, para redes anel duplo com 3,4,5 e 6 nós e propagação da informação em sentidos opostos nos dois anéis.

Da Figura B.2, tira-se os valores de atraso para redes com 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 nós, e à partir destes valores, pode-se deduzir a fórmula para uma rede com N nós.

$$\text{Para 3 nós: } \bar{\tau} = \frac{\tau + \tau}{2} = \frac{2}{2}\tau$$

$$\text{Para 4 nós: } \bar{\tau} = \frac{\tau + 2\tau + \tau}{3} = \frac{4}{3}\tau$$

$$\text{Para 5 nós: } \bar{\tau} = \frac{\tau + 2\tau + \tau + 2\tau}{4} = \frac{3}{2}\tau$$

$$\text{Para 6 nós: } \bar{\tau} = \frac{\tau + 2\tau + 3\tau + \tau + 2\tau}{5} = \frac{9}{5}\tau$$

$$\text{Para 7 nós: } \bar{\tau} = \frac{\tau + 2\tau + 3\tau + \tau + 2\tau + 3\tau}{6} = \frac{4}{2}\tau$$

$$\text{Para 8 nós: } \bar{\tau} = \frac{\tau + 2\tau + 3\tau + 4\tau + \tau + 2\tau + 3\tau}{7} = \frac{16}{7}\tau$$

$$\text{Para 9 nós: } \bar{\tau} = \frac{\tau + 2\tau + 3\tau + 4\tau + \tau + 2\tau + 3\tau + 4\tau}{8} = \frac{5}{2}\tau$$

Deve-se analisar separadamente as fórmulas para números pares ou ímpares de nós:

- Número par de nós:

Multiplicando-se o numerador e denominador das frações $\frac{4}{3}\tau$, $\frac{9}{5}\tau$ e $\frac{16}{7}\tau$ por 4, tem-se: $\frac{16}{4 \cdot 3}\tau$, $\frac{36}{4 \cdot 5}\tau$ e $\frac{64}{4 \cdot 7}\tau$.

Conclui-se que, para um número par de nós, o atraso médio de propagação entre nós é dado por:

$$\bar{\tau} = \frac{N^2}{4(N-1)}\tau \quad (\text{B.2})$$

- Número ímpar de nós:

Multiplicando-se o numerador e denominador das frações $\frac{2}{2}\tau$, $\frac{3}{2}\tau$, $\frac{4}{2}\tau$ e $\frac{5}{2}\tau$ por 2 tem-se: $\frac{4}{4}\tau$, $\frac{6}{4}\tau$, $\frac{8}{4}\tau$ e $\frac{10}{4}\tau$. Pode-se notar que, para um número ímpar de nós, o atraso médio de propagação entre nós é dado por:

$$\bar{\tau} = \frac{N+1}{4}\tau \quad (\text{B.3})$$

A fórmula geral para o atraso de propagação médio entre nós, para o duplo anel, é dada por:

$$\bar{\tau}_{\text{anel duplo}} = \begin{cases} \frac{N^2}{4(N-1)}\tau & \text{para } N \text{ par} \\ \frac{N+1}{4}\tau & \text{para } N \text{ ímpar} \end{cases} \quad (\text{B.4})$$

Como o menor anel é formado por 3 nós, é utilizada, no Capítulo 1, a fórmula para N ímpar.

B.1.3 Cálculo do atraso médio de propagação para a topologia Barramento Dobrado

Para a rede barramento, o valor do atraso médio de propagação entre nós é conseguido dividindo-se a soma dos atrasos de um nó para cada um dos outros nós da rede pelo número total de atrasos. No caso do barramento dobrado podem ser feitas duas análises:

1) Os pacotes não podem ser recebidos no lado transmissor

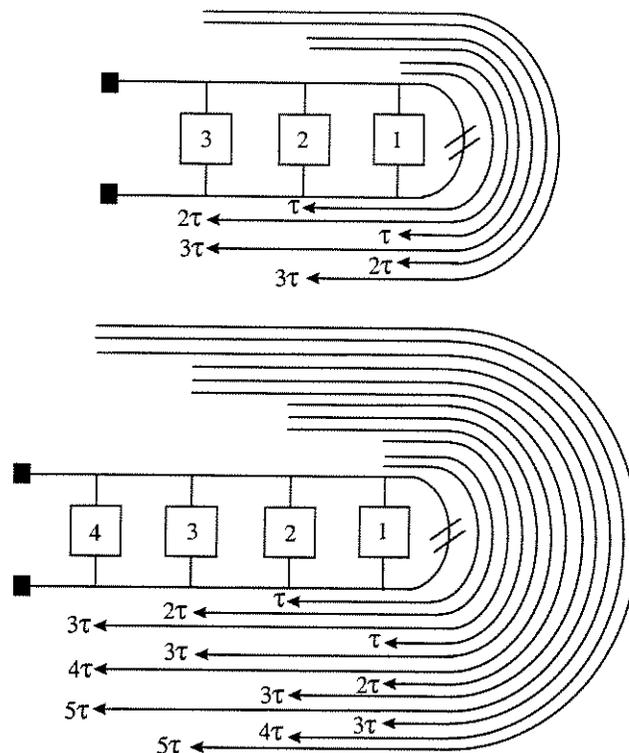


Figura B.3 - Atrasos de propagação de cada nó para os demais nós da rede, para redes de barramento dobrado com 3 e 4 nós, com pacotes não podendo ser recebidos no barramento de transmissão.

Da Figura B.3, tira-se os valores de atraso para redes com 3 e 4 nós, e à partir destes valores, pode-se deduzir a fórmula para uma rede com N nós.

$$\text{Para 3 nós: } \bar{\tau} = \frac{(\tau + 2\tau) + (\tau + 3\tau) + (2\tau + 3\tau)}{6} = 2\tau$$

$$\text{Para 4 nós: } \bar{\tau} = \frac{(\tau + 2\tau + 3\tau) + (\tau + 3\tau + 4\tau) + (2\tau + 3\tau + 5\tau) + (3\tau + 4\tau + 5\tau)}{12} = 3\tau$$

Como pode-se perceber, a fórmula geral para o atraso médio entre nós no caso do barramento dobrado, onde os pacotes não podem ser recebidos no lado transmissor, é dada por:

$$\bar{\tau}_{FUB} = (N - 1)\tau \quad (\text{B.5})$$

2) Os pacotes podem ser recebidos no lado transmissor

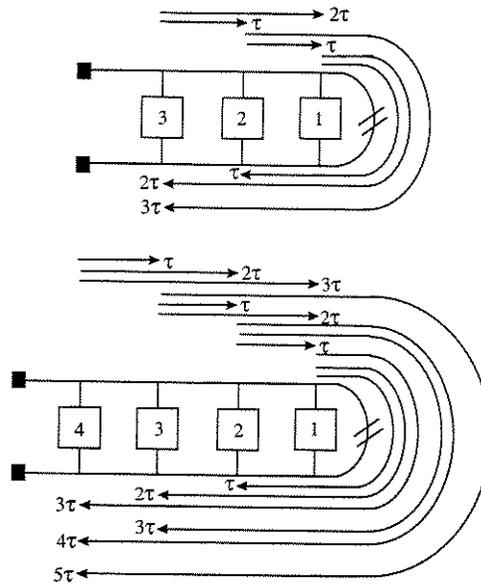


Figura B.4 - Atrasos de propagação de cada nó para os demais nós da rede, para redes de barramento dobrado com 3 e 4 nós, com pacotes podendo ser recebidos no lado transmissor.

Da Figura B.4, tira-se os valores de atraso para redes com 3 e 4 nós, e à partir destes valores, pode-se deduzir a fórmula para uma rede com N nós.

$$\text{Para 3 nós: } \bar{\tau} = \frac{(\tau + 2\tau) + (\tau + 3\tau) + (\tau + 2\tau)}{6} = \frac{5}{3}\tau$$

$$\text{Para 4 nós: } \bar{\tau} = \frac{(\tau + 2\tau + 3\tau) + (\tau + 3\tau + 4\tau) + (2\tau + \tau + 5\tau) + (3\tau + 2\tau + \tau)}{12} = \frac{7}{3}\tau$$

Com base nos resultados, pode-se tirar a fórmula geral para o atraso médio entre nós no barramento dobrado, onde os pacotes são recebidos no lado transmissor:

$$\bar{\tau}_{FUB} = \frac{2N-1}{3}\tau \quad (\text{B.6})$$

B.1.4 Cálculo do atraso médio de propagação para a topologia Barramento Duplo

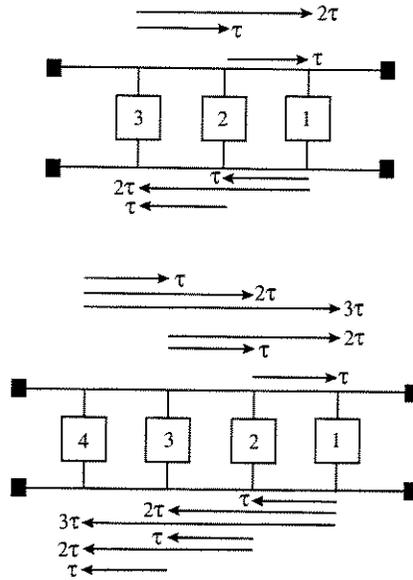


Figura B.5 - Atrasos de propagação de cada nó para os demais nós da rede, para redes de duplo barramento com 3 e 4 nós.

Da Figura B.5, tira-se os valores de atraso para redes com 3 e 4 nós, e à partir destes valores, pode-se deduzir a fórmula para uma rede com N nós.

$$\text{Para 3 nós: } \bar{\tau} = \frac{(\tau + 2\tau) + (\tau + \tau) + (\tau + 2\tau)}{6} = \frac{4}{3}\tau$$

$$\text{Para 4 nós: } \bar{\tau} = \frac{(\tau + 2\tau + 3\tau) + (\tau + \tau + 2\tau) + (\tau + 2\tau + \tau) + (3\tau + 2\tau + \tau)}{12} = \frac{5}{3}\tau$$

Conclui-se, então, que a fórmula geral para o atraso médio entre nós no barramento duplo é dada por:

$$\bar{\tau}_{DUB} = \frac{N+1}{3}\tau \quad (\text{B.7})$$

Apêndice C

Equações de Balanço Local

C.1 Equações de Balanço Local para o caso de transmissores ou receptores sintonizáveis

Através da Figura 2.2, pode-se retirar as seguintes equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} N\lambda \cdot p_0 = \mu \cdot p_1 \\ N\lambda \cdot \left(1 - \frac{1}{N}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{W}\right) \cdot p_1 = 2\mu \cdot p_2 \\ N\lambda \cdot \left(1 - \frac{2}{N}\right) \cdot \left(1 - \frac{2}{W}\right) \cdot p_2 = 3\mu \cdot p_3 \\ \vdots \\ N\lambda \cdot \left(1 - \frac{w}{N}\right) \cdot \left(1 - \frac{w}{W}\right) \cdot p_w = (w+1)\mu \cdot p_{w+1} \\ \vdots \\ N\lambda \cdot \left(1 - \frac{(W-1)}{N}\right) \cdot \left(1 - \frac{(W-1)}{W}\right) \cdot p_{W-1} = W\mu \cdot p_W \end{array} \right.$$

Isolando-se as probabilidades em função de p_0 , tem-se:

$$p_1 = N\lambda p_0$$

$$p_2 = \frac{N^2 \lambda^2}{2} \cdot p_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{N}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{W}\right)$$

$$p_3 = \frac{N^3 \lambda^3}{3 \cdot 2} \cdot p_0 \cdot \left(1 - \frac{2}{N}\right) \cdot \left(1 - \frac{2}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{N}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{W}\right)$$

$$p_4 = \frac{N^4 \lambda^4}{4 \cdot 3 \cdot 2} \cdot p_0 \cdot \left(1 - \frac{3}{N}\right) \cdot \left(1 - \frac{3}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{2}{N}\right) \cdot \left(1 - \frac{2}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{N}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{W}\right)$$

A fórmula geral, em função de p_0 , é portanto:

$$p_w = \frac{N^w \rho^w}{w!} \cdot p_0 \cdot \prod_{i=0}^{(w-1)} \left[\left(1 - \frac{i}{N}\right) \cdot \left(1 - \frac{i}{W}\right) \right] \quad (C.1)$$

Sabe-se que $\sum_{w=0}^W p_w = 1$, então:

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{j=0}^W \left[\frac{N^j \rho^j}{j!} \cdot \prod_{t=0}^{j-1} \left[\left(1 - \frac{t}{N}\right) \cdot \left(1 - \frac{t}{W}\right) \right] \right]} \quad (C.2)$$

Substituindo-se (C.2) em (C.1), tem-se:

$$p_w = \frac{\frac{N^w \rho^w}{w!} \cdot \prod_{i=0}^{(w-1)} \left[\left(1 - \frac{i}{N}\right) \cdot \left(1 - \frac{i}{W}\right) \right]}{\sum_{j=0}^W \left[\frac{N^j \rho^j}{j!} \cdot \prod_{t=0}^{j-1} \left[\left(1 - \frac{t}{N}\right) \cdot \left(1 - \frac{t}{W}\right) \right] \right]} \quad (C.3)$$

C.2 Equações de Balanço Local para o caso de transmissores e receptores sintonizáveis

Através da Figura 2.3, pode-se retirar as seguintes equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} N\lambda \cdot p_0 = \mu \cdot p_1 \\ N\lambda \cdot \left(1 - \frac{1}{N}\right)^2 \cdot p_1 = 2\mu \cdot p_2 \\ N\lambda \cdot \left(1 - \frac{2}{N}\right)^2 \cdot p_2 = 3\mu \cdot p_3 \\ \vdots \\ N\lambda \cdot \left(1 - \frac{w}{N}\right)^2 \cdot p_w = (w+1)\mu \cdot p_{w+1} \\ \vdots \\ N\lambda \cdot \left(1 - \frac{(W-1)}{N}\right)^2 \cdot p_{W-1} = W\mu \cdot p_W \end{array} \right.$$

Isolando-se as probabilidades em função de p_0 , tem-se:

$$p_1 = N\rho p_0$$

$$p_2 = \frac{N^2 \rho^2}{2} \cdot p_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{N}\right)^2$$

$$p_3 = \frac{N^3 \rho^3}{3 \cdot 2} \cdot p_0 \cdot \left(1 - \frac{2}{N}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{N}\right)^2$$

$$p_4 = \frac{N^4 \rho^4}{4 \cdot 3 \cdot 2} \cdot p_0 \cdot \left(1 - \frac{3}{N}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{2}{N}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{N}\right)^2$$

A fórmula geral, em função de p_0 , é portanto:

$$p_w = \frac{N^w \rho^w}{w!} \cdot p_0 \cdot \prod_{i=0}^{(w-1)} \left(1 - \frac{i}{N}\right)^2 \quad (\text{C.4})$$

Sabe-se que $\sum_{w=0}^W p_w = 1$, então:

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{j=0}^W \left[\frac{N^j \rho^j}{j!} \cdot \prod_{t=0}^{j-1} \left(1 - \frac{t}{N}\right)^2 \right]} \quad (\text{C.5})$$

Substituindo-se (C.5) em (C.4), tem-se:

$$p_w = \frac{\frac{N^w \rho^w}{w!} \cdot \prod_{i=0}^{(w-1)} \left(1 - \frac{i}{N}\right)^2}{\sum_{j=0}^W \left[\frac{N^j \rho^j}{j!} \cdot \prod_{t=0}^{j-1} \left(1 - \frac{t}{N}\right)^2 \right]} \quad (\text{C.6})$$

Referências Bibliográficas

- [1] S. Motoyama, “Redes de Comunicação”, apostila da disciplina IE-332, 1996.

Apêndice D

Dispositivos Ópticos Sintonizáveis

D.1 Lasers Sintonizáveis

Um laser sintonizável seria ideal se emitisse em um único modo, com largura de linha estreita e ter tempo de sintonia da ordem de nanossegundos, sobre uma faixa em torno de 100 nm para a janela de 1.3 μm e em torno de 150 nm para a janela de 1.5 μm . Apesar do grande número de técnicas desenvolvidas, nenhuma delas é capaz de alcançar todas essas características. Em lasers sintonizáveis, existe um importante compromisso entre *tempo* de sintonia e a faixa de sintonia de comprimento de onda.

D.1.1 Laser Sintonizável por Temperatura

Como o índice de refração da camada ativa do laser depende da temperatura, pode-se modificar a sintonia de comprimento de onda do laser modificando sua temperatura. Devido a questões de confiabilidade do laser, a mudança de temperatura não deve ser maior que $\pm 10^\circ\text{C}$. Como a sintonia por temperatura é aproximadamente 0.1 nm/ $^\circ\text{C}$, a faixa de sintonia alcançada é de no máximo 2 nm. Uma faixa de sintonia de 10.8 nm foi demonstrada em [1], utilizando-se laser MQW-DBR. O tempo de sintonia é limitado pela impedância térmica a poucos milissegundos.

D.1.2 Laser Sintonizável de Cavidade Externa

Pode-se aumentar a faixa de sintonia do laser adicionando-se um filtro sintonizável em uma das suas faces de saída, e revestindo-a com material anti-refletor. O filtro mais comumente empregado é a grade de difração, que funciona como um espelho e filtro faixa

estreita. O comprimento de onda é sintonizado pela movimentação da grade. Uma faixa de sintonia na ordem de 55 nm pode ser alcançada. Foi obtida uma faixa de 240 nm em experimentos com laser MQW [2]. Lasers com cavidade externa, utilizando grade de difração, têm a vantagem de possuir largura de linha estreita, mas possuem tempo de sintonia muito baixo (em torno de 0.1 segundo). O chamado “MAGIC laser” consegue tempo de sintonia da ordem de nanossegundos, mas sua faixa de sintonia alcançada é pequena (25 nm), podendo sintonizar 15 canais separados de 1.89 nm. Este laser utiliza um conjunto de elementos ativos (ao invés de um único laser) e grade de difração fixa [3].

D.1.3 Laser DFB de 2 Seções

Com a injeção de portadores na região ativa do laser, o índice de refração pode ser reduzido e com isso modificar o comprimento de onda de saída. Dois eletrodos são utilizados: um deles varia o índice de refração e define o comprimento de onda a ser emitido e o outro recebe o sinal elétrico que vai modular a luz. Um tempo de sintonia da ordem de nanossegundos pode ser alcançado, mas a faixa de sintonia contínua é limitada pela quantidade máxima de portadores que pode ser injetada na seção de seleção de comprimento de onda (3 nm).

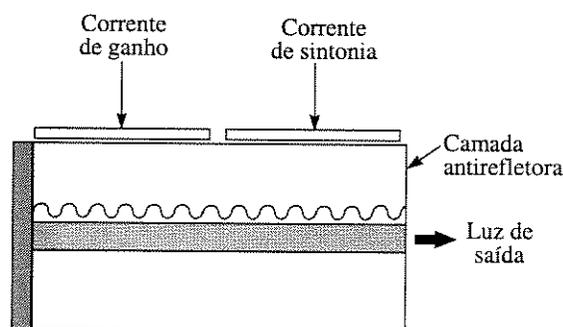


Figura D.1 - Esquema de um laser sintonizável DFB com duas seções.

D.1.4 Laser DBR de 3 Seções

Um aumento da faixa de sintonia do comprimento de onda é alcançado separando-se a região da grade seletiva de comprimento de onda da região de ganho dentro da cavidade do laser. A região da grade é feita com energia de *gap* maior que a energia de *gap* da região de ganho, para que a região da grade possa ser fortemente bombeada sem contribuir para a geração de fótons. A terceira seção é destinada ao controle de fase da luz dentro da cavidade do laser. Três eletrodos são utilizados: um para injeção da corrente de ganho e os outros dois para sintonia do laser (correntes de fase e de grade). A faixa de sintonia alcançada é em torno de 10 nm. Faixas de 48 nm e 83 nm foram alcançadas com laser MQW de InGaAsP/InP e

laser DBR de 3 seções com *superstructure grating* respectivamente. O tempo de sintonia é da ordem de nanosegundos [4] [5].

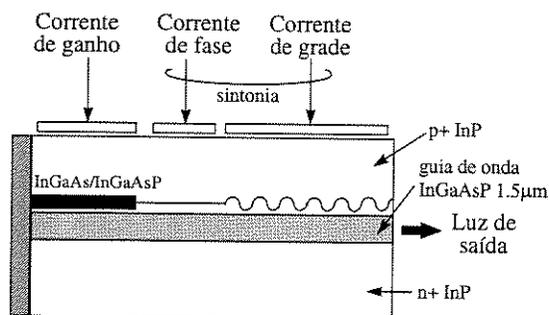


Figura D.2 - Esquema de um laser sintonizável DBR de 3 seções.

D.1.5 Laser Y

Este laser é constituído de um guia de onda em forma de Y e controlado por quatro eletrodos. Ele pode ser comparado a dois lasers FP colocados juntos para formar um laser em Y. Devido aos efeitos interferométricos entre os modos longitudinais dos dois lasers FP, o espectro de emissão do laser Y é um único modo longitudinal. Uma faixa de sintonia em torno de 40 nm pode ser alcançada, com *tempo* de sintonia da ordem de 5 a 10 ns [6].

D.1.6 Laser Emissor de Superfície com Caverna Vertical (VCSEL)

Este laser consiste de uma região ativa que funciona como um poço quântico entre duas seções de grade que servem como refletores. Este laser possui duas vantagens: excelente acoplamento com fibras monomodo (devido ao padrão de emissão circular) e a existência de um único modo longitudinal (o comprimento da caverna é de poucas dezenas de micra). Conjuntos de VCSELs com comprimentos de onda distintos e uniformemente espaçados podem ser utilizados como fontes de laser sintonizável, endereçando um laser por vez. Pode-se conseguir faixas de sintonia entre 10 e 200 nm e tempo de sintonia da ordem de nanosegundos.

D.2 Filtros Sintonizáveis

Filtros ópticos são componentes importantes em redes WDMA, utilizados para se selecionar um canal de um conjunto de vários canais com comprimentos de onda diferentes. A faixa de sintonia do filtro, o tempo de sintonia e o espaçamento entre canais são características importantes a serem analisadas num filtro. Outros fatores, também, devem ser levados em conta como: tamanho, estabilidade, dependência de polarização e perda por inserção.

D.2.1 Filtro Sintonizável Fabry-Perot (FPF)

A sintonia do canal é feita ajustando-se o comprimento da cavidade Fabry-Perot. Este tipo de filtro possui faixa de sintonia em torno de 50 nm e tempo de sintonia baixo (da ordem de milisegundos) sendo portanto apropriado somente para comutação por circuito. A largura de banda de 3 dB do filtro é de 0.5 nm. Posicionando-se filtros FP em cascata e isoladores entre eles, a largura de banda de 3 dB alcançada pode ser de 0.05 nm [7], aumentando-se o número de canais sintonizados.

D.2.2 Filtro Sintonizável Mach-Zender (MZF)

Em um filtro interferométrico de Mach-Zender de um estágio, o sinal de entrada com vários canais é dividido em um acoplador de 3 dB em 2 partes iguais. As 2 partes do sinal atravessam caminhos de comprimentos diferentes e aparecem juntas nas saídas de um outro acoplador de 3 dB. Para um sinal de entrada com 4 canais, tem-se 2 canais em cada saída do acoplador de 3 dB. Portanto para uma maior filtragem é necessário um outro filtro Mach-Zender. Para seleção de 1 canal em 2^M canais de um sinal de entrada, será necessário um filtro Mach-Zender com M estágios. A sintonia é alcançada pela variação térmica da diferença de comprimento dos caminhos em cada estágio do MZF. A faixa de sintonia é de 5 a 10 nm, com largura de banda de 3 dB de 0.01 nm e tempo de comutação de poucos milisegundos devido a inércia térmica.

D.2.3 Filtro Sintonizável Eletro-óptico (EOTF)

Este filtro utiliza mecanismos de acoplamento de modo seletivo de comprimento de onda utilizando efeitos eletro-ópticos. Ele é formado por dois divisores de polarização TE/TM e um conversor de modo TE/TM. O sinal de entrada com vários canais de polarização arbitrária é dividido em dois estados de polarização ortogonais pelo divisor de polarização. No conversor de modo TE/TM, uma perturbação periódica (como uma grade) é criada através de efeitos eletro-ópticos. Estas perturbações mudam o estado de polarização dos canais cuja condição de fase é satisfeita, enquanto que os canais que não satisfazem a condição de fase saem da região de perturbação sem alteração no estado de polarização. O segundo divisor de polarização separa os sinais polarizados, resultando na filtragem de comprimento de onda. A sintonia é alcançada pela mudança de tensão aplicada aos eletrodos, que leva à mudança do período da grade. A sintonia dos EOTFs são muito rápidas (nanosegundos), mas a faixa de sintonia é limitada a 10 nm. A largura de banda de 3 dB é em torno de 1 nm.

D.2.4 Filtro Sintonizável Acusto-óptico (AOFT)

O funcionamento do filtro acusto-óptico tem o mesmo princípio do funcionamento do filtro eletro-óptico, com a diferença que utiliza ondas acusto-ópticas para formar a grade de difração. A sintonia de comprimento de onda é alcançada variando-se as frequências das ondas acústicas. O AOFT tem uma faixa de sintonia larga que cobre toda a região de baixa perda das fibras monomodo entre 1.3 e 1.6 μm (em torno de 400 nm) e a largura de banda é similar ao EOFT ($\approx 1\text{nm}$). O tempo de sintonia do AOFT é limitado pelo tempo das ondas acústicas preencherem o comprimento de interação (na faixa de microsegundos). Este dispositivo tem a capacidade de selecionar vários canais simultaneamente, injetando-se mais de uma onda acústica no transdutor acústico do conversor de modo [8]. O número de canais que pode ser selecionado simultaneamente é limitado pela máxima potência de RF suportada pelo transdutor.

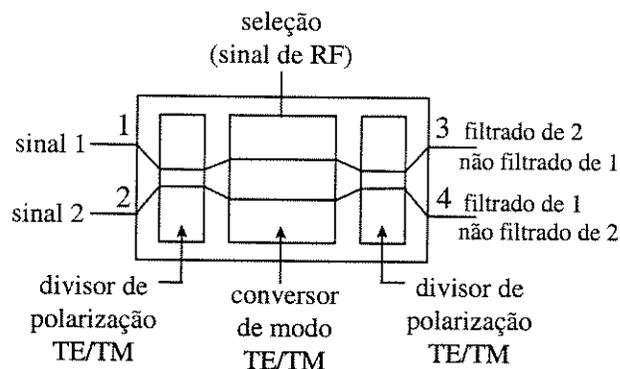


Figura D.3 - Esquema de um filtro acusto-óptico.

D.2.5 Filtro Sintonizável a Semicondutor

Lasers monomodos com grade interna (DFB ou DBR), quando alimentados por uma corrente abaixo do valor de limiar, operam como amplificadores ressonantes que amplificam somente os canais de entrada cuja frequência óptica coincida com aquela da estrutura do amplificador. As refletividades das faces são negligenciadas utilizando camadas anti-refletoras. A sintonia é conseguida pela variação da injeção de corrente, variando-se a frequência de ressonância. A faixa de sintonia é limitada a 5 nm e a largura de banda de 3 dB é de aproximadamente 0.05 nm. O tempo de sintonia é de poucos nanossegundos.

D.2.6 Filtro Sintonizável Brillouin a Fibra

O espalhamento de Brillouin estimulado (SBS) em fibras monomodo pode ser utilizado como mecanismo de amplificação seletivo para filtragem sintonizável de comprimento de onda. Um sinal óptico não modulado é injetado pelo receptor na fibra, na direção oposta dos canais de chegada. A amplificação seletiva de um dos canais depende da

potência de bombeio ($>10\text{mW}$) e do comprimento de interação (vários quilômetros de fibra) serem suficientes. A frequência do canal selecionado e a frequência de bombeio devem ser separados exatamente pela faixa de Brillouin ($\approx 11\text{ GHz}$ em $1.55\ \mu\text{m}$). A sintonia é feita utilizando-se um laser de bombeio sintonizável. A largura de banda é limitada pela largura de banda do ganho SBS (menor que 0.01nm). O tempo de comutação é determinado pelo tempo que o bombeio leva para preencher a fibra (na faixa de microsegundos).

Referências Bibliográficas

- [1] T. Kameda, "A DBR laser employing passive-section heaters, with 10.8 nm tuning range and 1.6 MHz linewidth", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 5, no. 6, pág. 608-610, junho 1993.
- [2] H. Tabuchi, "External grating tunable MQW laser with wide tuning range of 240 nm", *Electronics Letters*, vol. 26, no. 11, pág. 742-743, maio 1990.
- [3] J. B. D. Soole, "Multistriple array grating integrated cavity (MAGIC) laser: a new semiconductor laser for WDM applications", *Electronics Letters*, vol. 18, no. 19, pág. 1805-1807, setembro 1992.
- [4] I. Kim, "Broadly tunable InGaAsP/InP vertical-coupler filtered laser with low tuning current", *Electronics Letters*, vol. 29, no.8, pág. 664-666, abril 1993.
- [5] Y. Tohmori, "Over 100 nm wavelength tuning in superstructure grating (SSG) DBR lasers", *Electronics Letters*, vol. 29, no. 4, pág. 352-354, fevereiro 1993.
- [6] O. Hildebrand, "The Y-laser: a multifunctional device for optical communication systems and switching networks", *IEEE journal of Lightwave Technology*, vol. LT-11, no. 2, pág. 2066-2075, dezembro 1993.
- [7] C. M. Miller, "Wavelength locked two stages fiber Fabry-Perot filter for dense wavelength division demultiplexing in an erbium-doped fiber amplifier spectrum", *Electronics Letters*, vol. 28, no. 3, pág. 216-217, janeiro 1992.
- [8] D. A. Smith, J. E. Baran, J. J. Johnson, K. W. Cheung, "Integrated-optic acoustically-tunable filters for WDM networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 8, no. 6, agosto 1990.

Apêndice E

Modelo OSI/ISO

Para simplificar, as redes de computadores podem ser tratadas de forma estruturada. O modelo OSI divide a rede em camadas hierárquicas, de modo que um nível é associado a cada camada e cada camada utiliza serviços oferecidos pelas camadas inferiores. A arquitetura da rede é formada por camadas, interfaces e protocolos. Cada camada pode ser vista como um programa ou processo, implementado por *hardware* ou *software*, que se comunica com o processo correspondente na outra máquina. O protocolo define as regras que governam a conversação de um nível qualquer em uma máquina com outro nível equivalente em outra máquina. Interface é definida como o limite entre 2 níveis adjacentes.

O modelo OSI (Interconexão de sistemas abertos) é baseado numa proposta desenvolvida pela ISO (Organização de padronização internacional) visando a padronização internacional de protocolos utilizados em várias camadas. O modelo OSI tem este nome porque trata da conexão em sistemas abertos, ou seja, sistemas que são abertos para comunicação com outros sistemas. O modelo OSI não é uma arquitetura, uma vez que não especifica os protocolos empregados em cada camada. O modelo apenas informa a função de cada camada. O modelo OSI é formado por 7 camadas apresentadas na Figura E.1 e descritas a seguir.

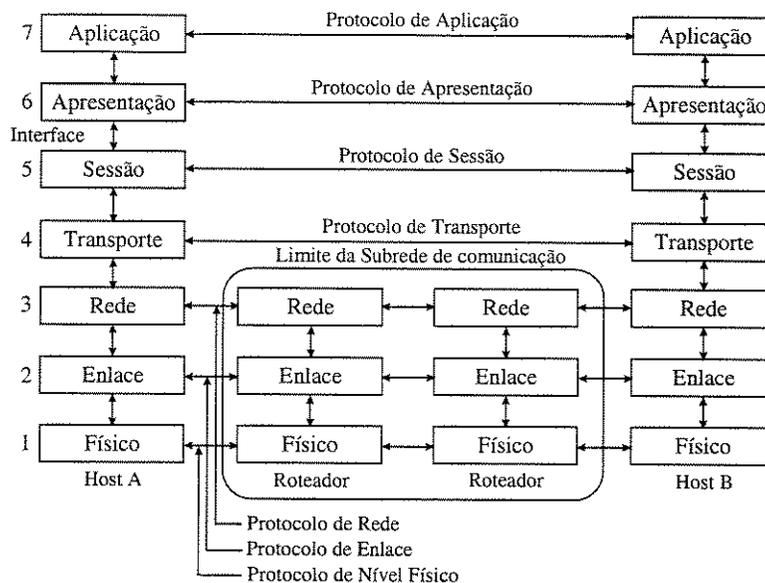


Figura E.1- Camadas do Modelo OSI.

E.1 Camada Física

A camada física trata da geração e propagação de sinais pelo meio físico. Esta camada tem a função de estabelecer, manter e desativar conexões físicas. O protocolo desta camada deve especificar a duração e intensidade do sinal, o modo de transmissão (*half-duplex* ou *full-duplex*, serial ou paralela), a forma como os nós são interconectados no meio físico (conectores, pinagem, etc), o tipo de multiplexação utilizado (FDM, TDM, CDM, WDM), a codificação do sinal (NRZ, RZ, Manchester, etc), a modulação do sinal (ASK, FSK, PSK, etc), enfim, especificar as características físicas e funcionais do meio físico.

E.2 Camada de Enlace

A função principal desta camada é a detecção de erros dos dados recebidos da camada física, fornecendo uma transmissão mais confiável às camadas superiores. Para isto, a camada de enlace particiona os dados em quadros, envia-os seqüencialmente e processa o reconhecimento (enviado pelo receptor) destes quadros. Esta camada tem a função de criar e reconhecer os limites dos quadros. A correção de erros é opcional nesta camada. O problema com duplicação de quadros ou chegada de quadros fora de ordem é tratado nas camadas superiores. A camada de enlace também tem a função de controlar o fluxo de quadros, de modo que o transmissor não envie quadros a uma taxa superior a que o receptor é capaz de processar. Em redes de difusão, o controle de acesso ao meio para canal compartilhado é tratado por uma subcamada da camada de enlace, localizada na interface com a camada física, conhecida como subcamada de acesso ao meio.

E.3 Camada de Rede

A camada de rede controla a operação da subrede. A principal função da camada de rede é o roteamento de pacotes. O roteamento pode ser estático (emprega a mesma rota entre os nós) ou dinâmico (baseado no tráfego corrente da rede, evitando gargalos). O serviço oferecido por esta camada pode ser por circuito virtual (orientado a conexão) ou datagrama (não-orientado a conexão). Outra função desta camada é a interconexão entre redes heterogêneas, realizando conversão dos formatos dos pacotes. Em redes de difusão, ou com uma única rota, a camada de rede é bem simples, uma vez que a função principal desta camada (roteamento) é inexistente.

E.4 Camada de Transporte

Na camada de transporte, a comunicação é fim-a-fim, isto é, da origem para o destino. Nas camadas inferiores, a comunicação é feita entre máquinas adjacentes. Esta camada isola as camadas superiores das mudanças de tecnologia de rede (*hardware*). A função básica da camada de transporte é receber dados da camada de sessão, dividi-los em unidades menores e passá-los para a camada de rede, sem duplicação e na ordem correta. Outras funções realizadas por esta camada são:

- multiplexagem (várias conexões de transporte partilhando a mesma conexão de rede), utilizada quando uma conexão de transporte não gera tráfego suficiente para ocupar toda a capacidade da conexão de rede;
- divisão (uma conexão de transporte ligada a várias conexões de rede), utilizada para aumentar a vazão da conexão de transporte;
- controle do fluxo de dados fim-a-fim (a camada de rede controla o fluxo somente entre máquinas adjacentes).

Existem três tipos de serviço da conexão de transporte:

- serviço rápido, onde as mensagens não tem garantia de entrega, ordem ou ausência de duplicação;
- serviço lento, onde as mensagens são enviadas na ordem e sem erros;
- serviço de difusão da mensagem para vários destinos.

Se a camada de rede for baseada em datagrama, o serviço para uma comunicação confiável deve ser realizado pela camada de transporte. No caso da camada de rede prover entrega confiável de pacotes, a camada de transporte tem uma estrutura mais simples.

E.5 Camada de Sessão

A camada de sessão permite que usuários de diferentes máquinas estabeleçam sessões entre si para organizar e sincronizar a troca de informação. Um dos serviços da camada de sessão é gerenciar o diálogo entre as máquinas. Apesar de um circuito permitir transmissão de informação nos 2 sentidos, a troca de informações pode ser full-duplex ou half-duplex. No segundo caso, a camada de sessão provê uma ficha de modo que o lado que detém a ficha pode transmitir. Outro serviço de sessão é a sincronização do diálogo. Este serviço utiliza o chamado ponto de sincronismo. Toda vez que o usuário recebe um ponto de sincronismo, ele deve responder ao usuário, com o qual está dialogando, um aviso de recebimento. Se uma conexão, por algum motivo, for interrompida e depois restabelecida, os usuários retomam o diálogo à partir do último ponto de sincronismo confirmado. Esta camada tem, também, a função de gerenciar atividades podendo suspender uma atividade em andamento para começar uma outra atividade com maior prioridade e, em seguida, retomar a atividade inicial.

E.6 Camada de Apresentação

Esta camada preocupa-se com a sintaxe e a semântica da informação transmitida, fornecendo serviços de representação canônica de dados, compressão de dados e criptografia. A representação canônica de dados é necessária quando se comunicam máquinas de arquitetura diferentes. A camada de apresentação converte uma estrutura de dados própria da máquina numa representação padrão da rede e vice-versa. A compressão de dados é útil para o envio de grandes massas de dados como imagens e textos. A criptografia é utilizada quando os dados transmitidos são confidenciais e pretende-se evitar sua interceptação por pessoas não autorizadas.

E.7 Camada de Aplicação

Existem vários tipos de terminais incompatíveis. Este problema de incompatibilidade é resolvido definindo-se um terminal virtual de rede e fazendo-se um *software* para mapear as funções no terminal virtual de rede no terminal real. Nesta camada, são definidas funções de gerenciamento e mecanismo genéricos para suporte de aplicações distribuídas e também mecanismos de serviços comumente utilizados por usuários de redes (correio eletrônico, transferência de arquivo, *login* remoto, etc).

Referências Bibliográficas

- [1] A. S. Tanenbaum, "Computer Networks", Third Edition, Prentice Hall, 1996.
- [2] L. F. G. Soares, G. Lemos, S. Colcher, "Redes de Computadores, Das LANs, MANs E WANs às Redes ATM", Segunda Edição, Editora Campus, 1995.
- [3] E. Cardoso, M. F. Magalhães, "Redes de Computadores: Modelo OSI/X.25", apostila DCA/FEEC/UNICAMP, 1996.

Apêndice F

Programa de Simulação da Rede Estrela

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <time.h>
#include <math.h>
#include <iostream.h>
#include <fstream.h>
#include <strstream.h>

strstream arq1,arq2,arq3;
ofstream arq_out1; //1o.arquivo de saida de dados (ro x vazao)
ofstream arq_out2; //2o.arquivo de saida de dados (vazao x atraso)
ofstream arq_out3; //3o.arquivo de saida de dados (vazao x atraso)

void leitura_dados(void); //funcao p/ ler arquivo de dados
void gera_arq_saida(void); //funcao p/ gerar e abrir arquivo de saida de dados
void aloca_memoria(void); //funcao p/ alocar memoria dinamica
void inicializa_valores(void); //inicializa valores de matrizes, vetores e vars.
float *zera_vetor(float *,float); //funcao que zera elem. do vetor float
int *zera_vetor(int *,float); //funcao que zera elem. do vetor int
float **zera_matriz(float **,float,float); //funcao que zera elem. da matriz
float **unidade_matriz(float **,float,float); //funcao que faz elem. da matriz=1
void gera_pacotes(void); //funcao que gera pacotes
void gera_controle(void); //funcao que gera matriz de controle
void decide_sucesso(void); //funcao que decide quem transmite ou nao
void rotinal(int); //funcao para deslocamento do buffer de pac. sem sucesso
void resultados(float); //funcao para calcular atraso e vazao dos pacotes
```

```

void gravacao_dados(void); //funcao p/ mandar resultados p/ arquivo de saida
void desaloca_memoria(void); //funcao para desalocar memoria alocada
void apaga_matriz(float **); //funcao para desalocar memoria das matrizes

int i,j,ji,jk,k,tam_buf_int=0,n;
float ts,tx,pd,t_sint,mini_slot,at=0,vaz,n_slot,dist_max,gvaz,gatr,gslot;
float cont_princ,ro,n_pac_tot,kat=0,tam_buf,pac_tot;
float vaz_e_s_a,at_e_slot,at_e_seg,vaz_e_pac_seg;

int *flag_ger; //flag de geracao de pacote de cada estacao
int *flag_transm; //flag de transmissao de cada estacao
float *pac_ger; //numero total de pacotes gerados
float *pac_suc; //numero total de pacotes com sucesso
float *at_p_slot; //atraso por slot
float *vaz_m_p_e; //vazao media por estacao
float **buf_pac_insuc; //matriz de pacotes transmitidos sem sucesso
float **temp; //matriz temporaria
float **cont; //matriz de controle
float **buf_pac_ger; //matriz de pacotes gerados

void main(void){
    randomize(); //Inicializa gerador de numeros aleatorios
    leitura_dados();
    mini_slot=80; //tamanho do mini slot em [bits]
    ts=max(n*mini_slot,pd+tx*t_sint); //tamanho do slot [bits]
    gera_arq_saida();
    tam_buf=6*dist_max;
    do{
        tam_buf_int+=1; //transforma tam_buf float p/ int
    }while(tam_buf_int<(tam_buf));
    aloca_memoria();
    ro=.05;
    do{
        cont_princ=1;
        inicializa_valores();
        do
        {
            at_p_slot=zera_vetor(at_p_slot,n);
            gera_pacotes(); //geracao de pacotes
            gera_controle(); //geracao da matriz de controle
            decide_sucesso(); //decide qual estacao tem sucesso na transmissao

```

```

        resultados(cont_princ); //calcula vazao e atraso medio dos pacotes
        cont_princ++;
    }while(cont_princ<=n_slot);
    gravacao_dados();
    ro+=.05;
}while(ro<1.01);
    arq_out1.close(); //Fecha 1o.arquivo de saida de dados
    arq_out2.close(); //Fecha 2o.arquivo de saida de dados
    arq_out3.close(); //Fecha 3o.arquivo de saida de dados
    desaloca_memoria();
    exit(0);
}

```

//funcao para fazer a leitura de dados

```

void leitura_dados(void){
    ifstream arq_in; //declaracao do arquivo de entrada de dados
    arq_in.open("c:\\bc4\\output\\in.dat"); //Abre arquivo de entrada de dados
    arq_in>>n; //Recebe numero de estacoes da rede
    arq_in>>n_slot; //Recebe numero de slots a serem analisados
    arq_in>>dist_max;//Recebe distancia maxima entre estacao e acoplador estrela
    arq_in>>tx; //Recebe taxa de transmissao por estacao em Gbps
    arq_in>>pd; //Recebe tamanho do pacote de dados em bytes
    arq_in>>t_sint; //Recebe tempo de sintonia do filtro em us
    arq_in.close(); //Fecha arquivo de entrada de dados
}

```

//funcao para gerar e abrir arquivo de saida de dados

```

void gera_arq_saida(void){

    arq1<<"c:\\bc4\\output\\out1"<<n<<".dat"<<ends;
    arq2<<"c:\\bc4\\output\\out2"<<n<<".dat"<<ends;
    arq3<<"c:\\bc4\\output\\out3"<<n<<".dat"<<ends;
    arq_out1.open(arq1.str());//Abre 1o.arquivo de saida de dados
    arq_out2.open(arq2.str());//Abre 2o.arquivo de saida de dados
    arq_out3.open(arq3.str());//Abre 3o.arquivo de saida de dados
}

```

//funcao para alocar memoria dinamica

```

void aloca_memoria(void){

    if((flag_ger=new int[n])==NULL)

```

```
        cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'flag_ger'"<<endl;
    if((flag_transm=new int[n])==NULL)
        cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'flag_transm'"<<endl;
    if((pac_ger=new float[n])==NULL)
        cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'pac_ger'"<<endl;
    if((pac_suc=new float[n])==NULL)
        cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'pac_suc'"<<endl;
    if((at_p_slot=new float[n])==NULL)
        cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'at_p_slot'"<<endl;
    if((vaz_m_p_e=new float[n])==NULL)
        cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'vaz_m_p_e'"<<endl;
    if((buf_pac_insuc=new float*[n])==NULL)
        cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'buf_pac_insuc (linhas)'"<<endl;
    else{
        for(int j = 0; j < n; j++)
            if((buf_pac_insuc[j] = new float[tam_buf_int+1])==NULL)
                cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'buf_pac_insuc (colunas)'"<<endl;
    }
    if((temp=new float*[n])==NULL)
        cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'temp (linhas)'"<<endl;
    else{
        for(int j = 0; j < n; j++)
            if((temp[j] = new float[3])==NULL)
                cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'temp (colunas)'"<<endl;
    }
    if((cont=new float*[n])==NULL)
        cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'cont (linhas)'"<<endl;
    else{
        for(int j = 0; j < n; j++)
            if((cont[j] = new float[4])==NULL)
                cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'cont (colunas)'"<<endl;
    }
    if((buf_pac_ger=new float*[n])==NULL)
        cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'buf_pac_ger (linhas)'"<<endl;
    else{
        for(int j = 0; j < n; j++)
            if((buf_pac_ger[j] = new float[20*tam_buf_int])==NULL)
                cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'buf_pac_ger (colunas)'"<<endl;
    }
}
```

```
//Funcao para inicializar os valores das matrizes, vetores e variaveis
```

```
void inicializa_valores(void){

    flag_ger=zera_vetor(flag_ger,n);
    flag_transm=zera_vetor(flag_transm,n);
    pac_ger=zera_vetor(pac_ger,n);
    pac_suc=zera_vetor(pac_suc,n);
    vaz_m_p_e=zera_vetor(vaz_m_p_e,n);
    buf_pac_insuc=zera_matriz(buf_pac_insuc,n,tam_buf+1);
    temp=zera_matriz(temp,n,3);
    cont=unidade_matriz(cont,n,4);
    buf_pac_ger=zera_matriz(buf_pac_ger,n,20*tam_buf);
    n_pac_tot=0;
    at=0;
    kat=0;
    vaz=0;
}
```

```
//Funcao para zerar os elementos de um vetor (float,int,etc...)
```

```
template<class T>
T *zera_vetor(T *vetor,float linha){

    int cont_zera_linha=0;

    do{
        vetor[cont_zera_linha]=0;
        cont_zera_linha+=1;
    }while(cont_zera_linha<linha);
    return(vetor);
}
```

```
//Funcao para zerar os elementos de uma matriz
```

```
float **zera_matriz(float **matr,float linha,float coluna){

    int cont_zera_linha=0,cont_zera_coluna;

    do{
        cont_zera_coluna=0;
        do{
            matr[cont_zera_linha][cont_zera_coluna]=0;

```

```

        cont_zera_coluna+=1;
    }while(cont_zera_coluna<coluna);
    cont_zera_linha+=1;
}while(cont_zera_linha<linha);
return(matr);
}

```

//Funcao para fazer os elementos de uma matriz igual a unidade

```

float **unidade_matriz(float **matr,float linha,float coluna){

    int cont_unidade_linha=0,cont_unidade_coluna;

    do{
        cont_unidade_coluna=0;
        do{
            matr[cont_unidade_linha][cont_unidade_coluna]=1;
            cont_unidade_coluna+=1;
        }while(cont_unidade_coluna<coluna);
        cont_unidade_linha+=1;
    }while(cont_unidade_linha<linha);
    return(matr);
}

```

//Funcao que gera pacotes

```

void gera_pacotes(void){

    int i=0,j;

    do{
        j=flag_transm[i];
        flag_ger[i]=flag_transm[i];
        while(buf_pac_ger[i][j]==1&&j<(20*tam_buf-2)){
            flag_ger[i]=j+3; //marca posicao do buf_pac_ger onde o pacote gerado
            j+=3;           //pode ser armazenado
            if(j>(20*tam_buf-3))
                j=20*tam_buf-2;
        }
        if(j==(20*tam_buf-2)){
            flag_ger[i]=0;
            j=0;
            while(buf_pac_ger[i][j]==1&&j<flag_transm[i]){

```

```

        flag_ger[i]=j+3; //marca posicao do buf_pac_ger onde o pacote gerado
        j+=3;          //pode ser armazenado
    }
    if(j<flag_transm[i]){
        if(random(101)<(100*ro)) //gera numero aleatorio p/ existencia ou nao de
pacote
            buf_pac_ger[i][flag_ger[i]]=1; //pacote eh gerado
        else
            buf_pac_ger[i][flag_ger[i]]=0; //pacote nao eh gerado
        if(buf_pac_ger[i][flag_ger[i]]==1){ //testa se um pacote foi gerado ou nao
            pac_ger[i]+=1; //incrementa contador de pacotes gerados
            buf_pac_ger[i][flag_ger[i]+1]=random(n);//gera estacao destino
            while(buf_pac_ger[i][flag_ger[i]+1]==i){ //testa se est. dest. nao eh
igual a fonte
                buf_pac_ger[i][flag_ger[i]+1]=random(n);//se igual gera
outra est. dest.
            }
        }
        else
            buf_pac_ger[i][flag_ger[i]+1]=0;//indica nenhum destino jah que
nenhum pac. foi gerado
            buf_pac_ger[i][flag_ger[i]+2]=0;//atraso do pacote gerado
        }
    }
    else{
        if(random(101)<(100*ro)) //gera numero aleatorio p/ existencia ou nao de pacote
            buf_pac_ger[i][flag_ger[i]]=1; //pacote eh gerado
        else
            buf_pac_ger[i][flag_ger[i]]=0; //pacote nao eh gerado
        if(buf_pac_ger[i][flag_ger[i]]==1){ //testa se um pacote foi gerado ou nao
            pac_ger[i]+=1; //incrementa contador de pacotes gerados
            buf_pac_ger[i][flag_ger[i]+1]=random(n);//gera estacao destino
            while(buf_pac_ger[i][flag_ger[i]+1]==i){ //testa se est. dest. nao eh igual a
fonte
                buf_pac_ger[i][flag_ger[i]+1]=random(n);//se igual gera outra est.
dest.
            }
        }
        else
            buf_pac_ger[i][flag_ger[i]+1]=0;//indica nenhum destino jah que nenhum
pac. foi gerado
    }
}

```

```

        buf_pac_ger[i][flag_ger[i]+2]=0;//atraso do pacote gerado
    }
    i++;
}while(i<n);
}

//Funcao que gera matriz de controle
void gera_controle(void){

    int i=0,ji=0;

    do{
        if(temp[i][0]==1){ //testa se tem pacote na matriz temporaria
            cont[i][0]=1; //controle recebe flag de presenca de info. (Bernoulli)
            cont[i][1]=1; //controle recebe flag de sucesso de transm. (default=1)
            cont[i][2]=temp[i][1]; //Controle recebe estacao destino
            cont[i][3]=temp[i][2]+1; //controle recebe atraso do pacote
        }
        else{
            if(buf_pac_ger[i][flag_transm[i]]==1){ //testa se tem pacote na matriz de pac. gerados
                cont[i][0]=1;//controle recebe flag de presenca de info. (Bernoulli)
                cont[i][1]=1;//controle recebe flag de sucesso de transm. (default=1)
                cont[i][2]=buf_pac_ger[i][flag_transm[i]+1];//Controle recebe estacao
destino

                cont[i][3]=buf_pac_ger[i][flag_transm[i]+2]+2*dist_max;//controle recebe
atraso do pacote

                buf_pac_ger[i][flag_transm[i]]=0; //zera posicao ocupada no buf_pac_ger
                buf_pac_ger[i][flag_transm[i]+1]=0; //se o pac. nao for transmitido
                buf_pac_ger[i][flag_transm[i]+2]=0; //ele vai para o buf_pac_insuc
                flag_transm[i]+=3;//incrementa posicao do prox. pac. a ser transmitido
                if(flag_transm[i]>20*tam_buf-3)//testa se esta posicao existe
                    flag_transm[i]=0; //se nao existir,retoma posicao inicial
            }
            else{
                ji=0;
                do{ //se nao ha pacotes na matriz de pac. ger. nem na matriz temp.
                    cont[i][ji]=0; //zera conteudo da matriz de controle
                    ji++;
                }while(ji<4);
            }
        }
    }
}

```

```

        i++; //analiza a proxima estacao
    }while(i<n);
}

//Funcao que decide quem transmite ou nao
void decide_sucesso(void){

    int i=0,j,t1;

    do{
        j=i+1;
        while((cont[i][0]!=0)&&(cont[i][1]==1)&&(j<n)){
            if(cont[i][2]==cont[j][2]){//analisa o caso de 2 est. com mesmo dest.
                if(cont[i][3]>cont[j][3]){//analisa qual est.tem maior atraso
                    cont[i][1]=1; //estacao com maior atraso de pac. tem sucesso
                    cont[j][1]=0; //estacao com menor atraso tem insucesso
                }
            }
            else{
                if(cont[i][3]==cont[j][3]){//analisa caso de 2 est.com mesmo at.
                    t1=random(2); //escolha aleatoria de 1 das 2 est.
                    if(t1==0){
                        cont[i][1]=0;
                        cont[j][1]=1;
                    }
                    else{
                        cont[i][1]=1;
                        cont[j][1]=0;
                    }
                }
            }
            else{
                cont[j][1]=1; //estacao com maior atraso de pac. tem
                sucesso
                cont[i][1]=0; //estacao com menor atraso tem insucesso
            }
        }
    }
    else
        cont[i][1]=1; //estacao tem sucesso se nenhuma outra est.tem mesmo dest.
    j++;
}
if(cont[i][0]==1){ //testa presenca de informacao

```

```

        if(cont[i][1]==1){ //testa se sucesso da transmissao
            pac_suc[i]+=1; //incrementa numero de pac. com sucesso de cada est.
            at_p_slot[i]=cont[i][3]; //recebe atraso do pac. com sucesso de cada est.
            rotinal(i);//rotina de deslocamento do buffer de pacotes sem sucesso
            buf_pac_insuc[i][tam_buf_int]=0; //zera a ultima posicao do buffer
            buf_pac_insuc[i][tam_buf_int-1]=0; //apos deslocamento dos pacotes
            buf_pac_insuc[i][tam_buf_int-2]=0; //se ha sucesso na transmissao
        }
        else{
            rotinal(i);//rotina de deslocamento do buffer de pacotes sem sucesso
            buf_pac_insuc[i][tam_buf_int]=2*dist_max+cont[i][3];
            buf_pac_insuc[i][tam_buf_int-1]=cont[i][2]; //insere pacote sem sucesso na
            buf_pac_insuc[i][tam_buf_int-2]=1; //ultima posicao do buffer
        }
        n_pac_tot+=1; //incrementa numero de pac. total transmitidos
    }
    else{
        rotinal(i);//rotina de deslocamento do buffer de pacotes sem sucesso
        buf_pac_insuc[i][tam_buf_int]=0; //zera a ultima posicao do buffer
        buf_pac_insuc[i][tam_buf_int-1]=0; //apos deslocamento dos pacotes
        buf_pac_insuc[i][tam_buf_int-2]=0; //se nao ha pacote p/ ser transmitido
    }
    i++;
}while(i<n);
}

```

//Funcao para deslocamento do buffer de pacotes sem sucesso

```
void rotinal(int contad){
```

```
    int ji=1;
```

```
    if(buf_pac_insuc[contad][1]==1){
```

```
        temp[contad][0]=1;
```

```
        temp[contad][1]=buf_pac_insuc[contad][2];
```

```
        temp[contad][2]=buf_pac_insuc[contad][3];
```

```
    }
```

```
    else{
```

```
        temp[contad][0]=0;
```

```
        temp[contad][1]=0;
```

```
        temp[contad][2]=0;
```

```
    }

    do{
        buf_pac_insuc[contad][ji]=buf_pac_insuc[contad][ji+3];
        buf_pac_insuc[contad][ji+1]=buf_pac_insuc[contad][ji+4];
        buf_pac_insuc[contad][ji+2]=buf_pac_insuc[contad][ji+5];
        ji+=3;
    }while(ji<=(tam_buf-5));
}
```

//Funcao para calcular atraso e vazao dos pacotes

```
void resultados(float k){

    float n_trans=0,at_n_slot=0,m_at_n_slot;
    int kj=0;

    vaz_e_s_a=0;

    do{
        if(at_p_slot[kj]!=0){
            at_n_slot+=at_p_slot[kj];
            n_trans++;
        }
        kj++;
    }while(kj<n);

    if(n_trans!=0){
        m_at_n_slot=at_n_slot/n_trans;
        at+=m_at_n_slot;
        kat++;
    }

    vaz=0;
    pac_tot=0;
    kj=0;

    do{
        vaz_m_p_e[kj]=pac_suc[kj]/k;
        kj++;
    }while(kj<n);
```

```

    kj=0;
    do{
        vaz_e_s_a+=vaz_m_p_e[kj];
        kj++;
    }while(kj<n);
    vaz_e_s_a=vaz_e_s_a/n;
    vaz_e_pac_seg=(vaz_e_s_a*tx)/pd;

    if(kat!=0){
        at_e_slot=at/kat;
        at_e_seg=(at_e_slot*ts)/tx;
    }
    if((fmod(k,n_slot)==0)){
        cout<<endl<<endl<<"Slot numero: "<<k;
        cout<<endl<<"Numero de estacoes: "<<n;
        cout<<endl<<"Carga por estacao: "<<ro;
        cout<<endl<<"Vazao por estacao: "<<vaz_e_s_a;
        cout<<" ou "<<vaz_e_pac_seg<<" [pac/seg]";
        cout<<endl<<"Atraso medio por estacao: "<<at_e_slot<<" [slots]";
        cout<<" ou "<<at_e_seg*10e3<<" [ms]";
    }
}

//Funcao para mandar os resultados para um arquivo de saida
void gravacao_dados(void){
    arq_out1<<ro<<" "<<vaz_e_s_a<<endl; //Recebe carga x vazao
    arq_out2<<vaz_e_s_a<<" "<<at_e_slot<<endl; //Recebe vazao x atraso
    arq_out3<<vaz_e_pac_seg<<" "<<at_e_seg<<endl; //Recebe vazao x atraso
}

//Funcao que desaloca memoria alocada
void desaloca_memoria(void){
    delete[] flag_ger;
    delete[] flag_transm;
    delete[] pac_ger;
    delete[] pac_suc;
    delete[] at_p_slot;
    delete[] vaz_m_p_e;
    apaga_matriz(buf_pac_insuc);
    apaga_matriz(temp);
}

```

```
    apaga_matriz(cont);
    apaga_matriz(buf_pac_ger);
}

//Funcao para desalocar memoria das matrizes
void apaga_matriz(float **matr) {
    for (int i = 0; i < n; i++)
        delete[] matr[i];    // apaga as colunas

    delete[] matr;          // apaga as linhas
}
```

Apêndice G

Programa de Simulação da Rede Anel

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <time.h>
#include <math.h>
#include <iostream.h>
#include <fstream.h>
#include <strstream.h>

strstream arq1,arq2,arq3;
ofstream arq_out1; //1o.arquivo de saida de dados (ro x vazao)
ofstream arq_out2; //2o.arquivo de saida de dados (vazao x atraso)
ofstream arq_out3; //3o.arquivo de saida de dados (vazao x atraso)

void leitura_dados(void); //funcao p/ ler arquivo de dados
void gera_arq_saida(void); //funcao p/ gerar e abrir arquivo de saida de dados
void aloca_memoria(void); //funcao p/ alocar memoria dinamica
void inicializa_valores(void); //inicializa valores de matrizes, vetores e vars.
float *zera_vetor(float *,int); //funcao que zera elem. do vetor float
int *zera_vetor(int *,int); //funcao que zera elem. do vetor int
void gera_pacotes(void); //funcao que gera pacotes
void retira_pac_anel(void); //funcao que retira pacotes do anel
void insere_pac_anel(void); //funcao que insere pacotes no anel
void desloca_pac_anel(void); //funcao que desloca pacotes no anel
void resultados(float); //funcao para calcular atraso e vazao dos pacotes
void gravacao_dados(void); //funcao p/ mandar resultados p/ arquivo de saida
void desaloca_memoria(void); //funcao para desalocar memoria alocada
```

```

int i,j,ji,jk,k,dist_max_int=0,n,mesmo_destino,zera_linha,zera_coluna,tam_buf,num;
float r,ts,tx,pd,t_sint,mini_slot,at=0,vaz,n_slot,dist_max,gvaz,gatr,gslot;
float cont_princ,ro,n_pac_tot,kat=0,pac_tot;
float vaz_e_s_a,at_e_slot,at_e_seg,vaz_e_pac_seg;

int *flag_ger; //flag de geracao de pacote de cada estacao
int *flag_transm; //flag de transmissao de cada estacao
float *pac_ger; //numero total de pacotes gerados
float *pac_suc; //numero total de pacotes com sucesso
float *at_p_slot; //atraso por slot
float *vaz_m_p_e; //vazao media por estacao
float *temp; //matriz temporaria
float *buf_pac_ger; //matriz de pacotes gerados
float *pac_anel; //matriz de pacotes no anel

void main(void){
    randomize(); //Inicializa gerador de numeros aleatorios
    leitura_dados();
    ts=pd;//tamanho do slot [bits]
    gera_arq_saida();
    do{
        dist_max_int+=1; //transforma dist_max float p/ int
    }while(dist_max_int<(dist_max));
    tam_buf=30*dist_max_int;
    num=1+dist_max_int;
    aloca_memoria();
    ro=.05;
    do{
        cont_princ=1;
        inicializa_valores();
        do
        {
            at_p_slot=zera_vetor(at_p_slot,n);
            gera_pacotes(); //geracao de pacotes
            retira_pac_anel(); //a estacao retira pacote do anel
            insere_pac_anel(); //a estacao insere pacote no anel
            desloca_pac_anel(); //os pacotes do anel sao deslocados
            resultados(cont_princ); //calcula vazao e atraso medio dos pacotes
            cont_princ++;
        }while(cont_princ<=n_slot);
    }
}

```

```
        gravacao_dados();
        ro+=.05;
    }while(ro<1.01);
    arq_out1.close(); //Fecha 1o.arquivo de saida de dados
    arq_out2.close(); //Fecha 2o.arquivo de saida de dados
    arq_out3.close(); //Fecha 3o.arquivo de saida de dados
    desaloca_memoria();
    exit(0);
}

//funcao para fazer a leitura de dados
void leitura_dados(void){
    ifstream arq_in; //declaracao do arquivo de entrada de dados
    arq_in.open("c:\\Bc45\\output\\in.dat"); //Abre arquivo de entrada de dados
    arq_in>>n; //Recebe numero de estacoes da rede
    arq_in>>n_slot; //Recebe numero de slots a serem analisados
    arq_in>>dist_max;//Recebe distancia maxima entre estacao e acoplador estrela
    arq_in>>tx; //Recebe taxa de transmissao por estacao em Gbps
    arq_in>>pd; //Recebe tamanho do pacote de dados em bits
    arq_in>>r; //Recebe quantas vezes o pac.dados e maior que o pac.contr.
    arq_in>>t_sint; //Recebe tempo de sintonia do filtro em us
    arq_in.close(); //Fecha arquivo de entrada de dados
}

//funcao para gerar e abrir arquivo de saida de dados
void gera_arq_saida(void){

    arq1<<"c:\\Bc45\\output\\out1"<<n<<".dat"<<ends;
    arq2<<"c:\\Bc45\\output\\out2"<<n<<".dat"<<ends;
    arq3<<"c:\\Bc45\\output\\out3"<<n<<".dat"<<ends;
    arq_out1.open(arq1.str());//Abre 1o.arquivo de saida de dados
    arq_out2.open(arq2.str());//Abre 2o.arquivo de saida de dados
    arq_out3.open(arq3.str());//Abre 3o.arquivo de saida de dados
}

//funcao para alocar memoria dinamica
void aloca_memoria(void){

    if((flag_ger=new int[n])==NULL)
        cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'flag_ger'"<<endl;
    if((flag_transm=new int[n])==NULL)
```

```

        cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'flag_transm'"<<endl;
    if((pac_ger=new float[n])==NULL)
        cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'pac_ger'"<<endl;
    if((pac_suc=new float[n])==NULL)
        cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'pac_suc'"<<endl;
    if((at_p_slot=new float[n])==NULL)
        cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'at_p_slot'"<<endl;
    if((vaz_m_p_e=new float[n])==NULL)
        cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'vaz_m_p_e'"<<endl;
    if((temp=new float[3*n])==NULL)
        cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'temp'"<<endl;
    if((buf_pac_ger=new float[n*tam_buf])==NULL)
        cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'buf_pac_ger'"<<endl;
    if((pac_anel=new float[(dist_max_int+1)*n*3*n])==NULL)
        cerr<<"Erro de alocao de memoria em 'buf_pac_ger'"<<endl;
}

```

//Funcao para inicializar os valores das matrizes, vetores e variaveis

```
void inicializa_valores(void){
```

```

    flag_ger=zera_vetor(flag_ger,n);
    flag_transm=zera_vetor(flag_transm,n);
    pac_ger=zera_vetor(pac_ger,n);
    pac_suc=zera_vetor(pac_suc,n);
    vaz_m_p_e=zera_vetor(vaz_m_p_e,n);
    temp=zera_vetor(temp,3*n);
    buf_pac_ger=zera_vetor(buf_pac_ger,n*tam_buf);
    pac_anel=zera_vetor(pac_anel,(dist_max_int+1)*n*3*n);
    n_pac_tot=0;
    at=0;
    kat=0;
    vaz=0;
}

```

//Funcao para zerar os elementos de um vetor (float,int,etc...)

```
template<class T>
```

```
T *zera_vetor(T *vetor,int linha){
```

```
    zera_linha=0;
```

```
    do{
```

```

        vetor[zera_linha]=0;
        zera_linha+=1;
    }while(zera_linha<linha);
    return(vetor);
}

//Funcao que gera pacotes
void gera_pacotes(void){

    int i=0,j;

    do{
        j=flag_transm[i];
        flag_ger[i]=flag_transm[i];
        while(buf_pac_ger[(i*tam_buf)+j]==1&&j<(30*dist_max-2)){
            flag_ger[i]=j+3; //marca posicao do buf_pac_ger onde o pacote gerado
            j+=3;           //pode ser armazenado
            if(j>(tam_buf-3))
                j=tam_buf-2;
        }
        if(j==(tam_buf-2)){
            flag_ger[i]=0;
            j=0;
            while(buf_pac_ger[(i*tam_buf)+j]==1&&j<flag_transm[i]){
                flag_ger[i]=j+3; //marca posicao do buf_pac_ger onde o pacote gerado
                j+=3;           //pode ser armazenado
            }
            if(j<flag_transm[i]){
                if(random(101)<(100*ro)) //gera numero aleatorio p/ existencia ou nao de
pacote
                    buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_ger[i]]=1; //pacote eh gerado
                else
                    buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_ger[i]]=0; //pacote nao eh gerado
                if(buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_ger[i]]==1){ //testa se um pacote foi
gerado ou nao
                    pac_ger[i]+=1; //incrementa contador de pacotes gerados
                    buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_ger[i]+1]=random(n); //gera estacao
destino
                    while(buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_ger[i]+1]==i){ //testa se est.
dest. nao eh igual a fonte

```

```

        buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_ger[i]+1]=random(n);//se
igual gera outra est. dest.
    }
}
else
    buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_ger[i]+1]=0;//indica nenhum destino
jah que nenhum pac. foi gerado
    buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_ger[i]+2]=0;//atraso do pacote gerado
}
}
else{
    if(random(101)<(100*ro)) //gera numero aleatorio p/ existencia ou nao de pacote
        buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_ger[i]]=1; //pacote eh gerado
    else
        buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_ger[i]]=0; //pacote nao eh gerado
    if(buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_ger[i]]==1){ //testa se um pacote foi gerado ou nao
        pac_ger[i]+=1; //incrementa contador de pacotes gerados
        buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_ger[i]+1]=random(n);//gera estacao destino
        while(buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_ger[i]+1]==i){ //testa se est. dest. nao
eh igual a fonte
            buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_ger[i]+1]=random(n);//se igual gera
outra est. dest.
        }
    }
    else
        buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_ger[i]+1]=0;//indica nenhum destino jah que
nenhum pac. foi gerado
        buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_ger[i]+2]=0;//atraso do pacote gerado
    }
    i++;
}while(i<n);
}

//Funcao que retira pacote do anel
void retira_pac_anel(void){

    int i=0,j=0;

    do{

        for(j=0;j<(3*n)-2;j=j+3){ //p/ todos os pac. passam naquela est. naquele slot tempo
            if(pac_anel[(num*i*3*n)+j]==1){ //se existe pacote

```

```

        if(pac_anel[(num*i*3*n)+j+1]==i){ //se o pacote e destinado a esta estacao
            pac_suc[j/3]+=1; //incrementa numero de pac. com sucesso
            at_p_slot[j/3]=pac_anel[(num*i*3*n)+j+2]+1; //armazena atraso do
pac.
        }
    }
}
if(pac_anel[(num*i*3*n)+(3*i)]==1){
    pac_anel[(num*i*3*n)+(3*i)]=0; //apaga pacote que ja deu 1 volta
    pac_anel[(num*i*3*n)+(3*i)+1]=0; //completa no anel
    pac_anel[(num*i*3*n)+(3*i)+2]=0;
}
i++; //analiza a proxima estacao
}while(i<n);
}

```

//Funcao que insere pacotes no anel

```
void insere_pac_anel(void){
```

```

    int i=0,j=0;

    do{
        mesmo_destino=0;
        if(buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_transm[i]]==1){ //se ha pacote p/ transmitir
            for(j=0;j<(3*n-2);j=j+3){ //p/ todos pac. passam na est. naquele slot tempo
                if(pac_anel[(i*3*n)*num+j]==1){ //se ha pacote

                    if(pac_anel[(i*3*n)*num+j+1]==buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_transm[i]+1]){
                        //se destino do pac. no anel e igual ao destino do pacote a
ser
                            //transmitido pela estacao
                            mesmo_destino=1;
                            buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_transm[i]+2]+=1;
                    }
                }
            }
        }
        if(mesmo_destino==0){ //se pac. da est. nao tem destino igual aos pac. que
                                //ja estao no anel
            pac_anel[(num*i*3*n)+(i*3)]=buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_transm[i]];

            pac_anel[(num*i*3*n)+(i*3)+1]=buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_transm[i]+1];

```

```

pac_anel[(num*i*3*n)+(i*3)+2]=buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_transm[i]+2];
        //coloca pacote no anel
        buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_transm[i]]=0;
        buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_transm[i]+1]=0;
        buf_pac_ger[(i*tam_buf)+flag_transm[i]+2]=0;
        //apaga pacote do buffer
        n_pac_tot+=1;
        flag_transm[i]+=3; //incrementa flag do proximo pac. a ser transmitido
        if(flag_transm[i]>30*dist_max-3)
            flag_transm[i]=0;
    }
}
i=i++; //analisa a proxima estacao
}while(i<n);
}

```

//Funcao para deslocar pacotes no anel

```
void desloca_pac_anel(void){
```

```
    int j=0,i,final;
```

```
    final=num*n-1; //ultimo slot do anel
```

```
    for(j=0;j<3*n;j++){ //para todos os slots do anel
```

```
        temp[j]=pac_anel[(final*3*n)+j]; //copia os pacotes do ultimo slot
```

```
    //do
```

```
    anel p/ um vetor temporario
```

```
    }
```

```
    for(i=final;i>0;i--){ //p/ todos slots do anel (ultimo p/ primeiro)
```

```
        for(j=0;j<3*n;j++) //p/ todos pac. do slot
```

```
            pac_anel[(i*3*n)+j]=pac_anel[((i-1)*3*n)+j];
```

```
            //copia todos pac. do slot (n-1) p/ o slot n do anel
```

```
        }
```

```
    for(j=0;j<3*n;j++){
```

```
        pac_anel[j]=temp[j]; //copia os pac. do vetor temp. p/ o anel
```

```
    }
```

```
    for(i=0;i<final+1;i++){ //p/ todos os slots do anel
```

```
        for(j=0;j<(3*n)-2;j=j+3){ //p/ todos os pac. de cada slot
```

```
            if(pac_anel[(i*3*n)+j]==1) //se existe pacote
```

```
                pac_anel[(i*3*n)+j+2]+=1; //incrementa o atraso do pacote
```

```
        }
    }
}

//Funcao para calcular atraso e vazao dos pacotes
void resultados(float k){

    float n_trans=0,at_n_slot=0,m_at_n_slot;
    int kj=0;

    vaz_e_s_a=0;

    do{
        if(at_p_slot[kj]!=0){
            at_n_slot+=at_p_slot[kj];
            n_trans++;
        }
        kj++;
    }while(kj<n);

    if(n_trans!=0){
        m_at_n_slot=at_n_slot/n_trans;
        at+=m_at_n_slot;
        kat++;
    }

    vaz=0;
    pac_tot=0;
    kj=0;

    do{
        vaz_m_p_e[kj]=pac_suc[kj]/k;
        kj++;
    }while(kj<n);

    kj=0;
    do{
        vaz_e_s_a+=vaz_m_p_e[kj];
        kj++;
    }while(kj<n);
    vaz_e_s_a=vaz_e_s_a/n;
```

```
vaz_e_pac_seg=(vaz_e_s_a*tx)/pd;

if(kat!=0){
    at_e_slot=at/kat;
    at_e_seg=(at_e_slot*ts)/tx;
}
if((fmod(k,n_slot)==0)){
    cout<<endl<<endl<<"Slot numero: "<<k;
    cout<<endl<<"Numero de estacoes: "<<n;
    cout<<endl<<"Carga por estacao: "<<ro;
    cout<<endl<<"Vazao por estacao: "<<vaz_e_s_a;
    cout<<" ou "<<vaz_e_pac_seg<<" [pac/seg]";
    cout<<endl<<"Atraso medio por estacao: "<<at_e_slot<<" [slots]";
    cout<<" ou "<<at_e_seg*10e3<<" [ms]";
}
}

//Funcao para mandar os resultados para um arquivo de saida
void gravacao_dados(void){
    arq_out1<<ro<<" "<<vaz_e_s_a<<endl; //Recebe carga x vazao
    arq_out2<<vaz_e_s_a<<" "<<at_e_slot<<endl; //Recebe vazao x atraso
    arq_out3<<vaz_e_pac_seg<<" "<<at_e_seg<<endl; //Recebe vazao x atraso
}

//Funcao que desaloca memoria alocada
void desaloca_memoria(void){

    delete[] flag_ger;
    delete[] flag_transm;
    delete[] pac_ger;
    delete[] pac_suc;
    delete[] at_p_slot;
    delete[] vaz_m_p_e;
    delete[] temp;
    delete[] buf_pac_ger;
    delete[] pac_anel;
}
```