

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

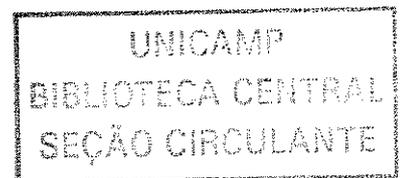
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

DEPARTAMENTO DE COMUNICAÇÕES

Filipe Guimarães Lins

***Desempenho de redes WDM com restrições
sobre o número de transceptores por nó***

01.06.04



Campinas
2004

Este exemplar corresponde a redação final da tese
elaborada por Filipe Guimarães Lins
e aprovada pela Comissão
 julgada em 21/02/04
Adalberto Waldman
Orientador

Filipe Guimarães Lins

***Desempenho de redes WDM com restrições
sobre o número de transceptores por nó***

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Telecomunicações e Telemática.

Orientador: Prof. Dr. Helio Waldman.

Campinas
2004

UNIDADE	BC
Nº CHAMADA	UNICAMP
	L651d
V	EX
TOMBO BC	58765
PROC.	16-227-09
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	11,100
DATA	02-07-04
Nº CPD	

CM00198199-2

BIB ID 317431

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

L651d Lins, Filipe Guimarães
Desempenho de redes WDM com restrições sobre o número de transceptores por nó / Filipe Guimarães Lins. --Campinas, SP: [s.n.], 2004.

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

1. Redes em anel – Redes de Computação. 2. Fibras óticas. 3. Comunicações óticas. I. Waldman, Helio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Filipe Guimarães Lins

***Desempenho de redes WDM com restrições
sobre o número de transceptores por nó***

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Telecomunicações e Telemática. Aprovação em 27/02/2004.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Helio Waldman (presidente)
DECOM / FEEC / UNICAMP

Prof. Dr. Leonardo de Souza Mendes
DECOM / FEEC / UNICAMP

Prof. Dr. Maurício Ferreira Magalhães
DCA / FEEC / UNICAMP

Prof. Dr. Ricardo M. Campello de Souza
UFPE

Campinas
2004

Resumo

O objetivo desta dissertação é mostrar as características do desempenho de redes WDM quando os números de comprimentos de onda e transceptores, bem como a sintonizabilidade destes, variam. A sintonizabilidade, importante característica dos transceptores, mostra-se um fator de grande influência no desempenho e custo da rede. Configurações específicas podem ser selecionadas de acordo com valores de relação custo-benefício. Todos os fatores causadores de bloqueios são estudados no sentido de caracterizar os seus graus de influência na rede. As simulações mostram um número ótimo de transceptores por nó na maximização de tráfego por transceptor numa dada probabilidade de bloqueio. A situação-limite representada pelo desempenho de uma rede com amplos recursos de banda na fibra, mas limitada pelos recursos nodais, também é analisada nesta dissertação. Qualquer rede prática com a mesma quantidade de recursos nodais terá desempenho inferior a esta situação-limite.

Palavras-chave: WDM, transceptores, “transponders”, sintonizabilidade, probabilidade de bloqueio, redes ópticas.

Abstract

The goal of this dissertation is to show the performance characteristics of WDM networks as a function of the number of wavelengths and transceivers. The tunability, an important feature of the transceivers, is a factor with great influence in the performance and cost of the network. Specific configurations can be selected according to their cost efficiency. All factors that cause blocking are analyzed in order to characterize their influence in the network. The simulations point to the existence of an optimal number of transceivers per node in the maximization of traffic per transceiver for a given blocking probability. The bound represented by the performance of an infinite bandwidth network with limited nodal resources is also analyzed in this dissertation. Any practical network with the same nodal resources will have worse performance than this bound.

Key words: WDM, transceivers, transponders, tunability, blocking probability, optical networks.

*Dedico este trabalho a **DEUS**, o criador dos céus e da terra,
o autor da VIDA; sem ELE nada disso teria sido possível.
Muito obrigado, **DEUS!!!***

“... não temas, porque EU sou contigo; não te assombres, porque EU sou o teu DEUS; EU te fortaleço, e te ajudo, e te sustento com a minha destra fiel.”

Is 41:10

Agradecimentos

É com muita alegria que vejo este trabalho concluído. Primeiramente agradeço a DEUS pelo dom da vida e por todo o cuidado que Ele tem tido comigo;

Agradeço aos meus pais Walter Argemiro Lins e Eulina Lopes Guimarães Lins por todo o apoio que eles me deram e por tudo o que eles são pra mim;

Ao Prof. Dr. Helio Waldman os meus eternos agradecimentos por ter me recebido no programa de mestrado, por seu apoio em todos os momentos e pela convivência bastante amigável;

Também agradeço ao Prof. Dr. Ricardo Campello e ao Prof. Dr. Valdemar Cardoso pelo apoio que me deram para a realização do mestrado;

Agradeço aos amigos Hélder, Juliana e Raul que me receberam em Campinas;

Agradeço aos amigos Crizan, Flávio, Iguatemi e Raul que me ajudaram na realização deste trabalho;

Aos amigos do laboratório OptiNet pela convivência;

Ao apoio financeiro da Ericsson Telecomunicações do Brasil S.A. e da CAPES;

Agradecimentos especiais aos meus grandes amigos da célula que representaram e/ou têm representado a minha família aqui em Campinas: Bete, Carol, Cleison, Crizan, Eduardo, Flávio, Hiata, Grace, Judy, Marcos, Richard, Silvana, Stela, Ted e Thaís;

Enfim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente nesta fase de minha vida. Muito obrigado!

Índice

Lista de acrônimos	1
1 – Introdução	2
1.1 - Aspectos gerais	2
1.2 - Proposta da pesquisa	3
2 – Evolução das redes ópticas	5
2.1 – Tecnologia	5
2.2 – Breve histórico	11
3 – Redes WDM	19
3.1 – Elementos de uma rede óptica WDM	22
3.1.1 – “Optical Line Terminal” (OLT)	23
3.1.2 – “Optical Add/Drop Multiplexer” (OADM)	24
3.1.3 – “Optical Crossconnect” (OXC)	28
3.2 – Algumas configurações WDM	32
3.3 – Anéis WDM	35
4 – Anéis WDM com números limitados de transceptores e comprimentos de onda	41
4.1 – Tipos de bloqueio	47
4.2 – Simulações	50
5 – Redes WDM limitadas apenas pelos recursos nodais	64
6 – Conclusões	82
Referências bibliográficas	83
 PUBLICAÇÕES:	
ANEXO 1 - SBrT 2003 – Simpósio Brasileiro de Telecomunicações	85
ANEXO 2 - Workshop ciência e tecnologia em comunicações ópticas, 2003	90
ANEXO 3 - ONDM 2004 – Optical Network Design and Modelling	93

Lista de acrônimos

B	- taxa de bits por segundo;
DRS	- “Dynamic Routing/Shortest Path First”
ICP	- incompatibilidade;
L	- distância (km);
Lambda, λ	- comprimento de onda;
N	- número de nós;
n_1	- índice de refração do núcleo;
n_2	- índice de refração da casca;
OADM	- “Optical Add/Drop Multiplexer”;
OLT	- “Optical Line Terminal”;
OXC	- “Optical Crossconnect”;
RWA	- “Routing and Wavelength Assignment”;
RX	- receptor;
SPR	- “Shortest Path Routing”;
TX	- transmissor;
W	- número de comprimentos de onda;
WDM	- “Wavelength Division Multiplexing”.

1 – Introdução

1.1 – Aspectos gerais

A evolução das redes ópticas está diretamente ligada ao crescimento de tráfego, o qual tem sido influenciado por aparecimento de novas aplicações e usuários, estes exigindo cada vez mais uma maior demanda. Este processo já tem sido bem estabelecido, com tendência a um crescimento estável nos próximos anos.

De fato, a tecnologia atual capaz de suportar grandes taxas de transmissão tem sido a WDM (“Wavelength Division Multiplexing”). As redes WDM atuais também são conhecidas como redes de roteamento de comprimentos de onda, as quais são capazes de transportar caminhos ópticos, criando conexões transparentes entre os nós da rede. Para se estabelecer um caminho óptico, duas condições são fundamentais e necessárias: 1 – no mínimo um comprimento de onda tem que estar disponível na fibra em cada “link” por onde a requisição objetiva passar e, em caso de não utilização da conversão de comprimento de onda, este último terá de ser o mesmo em todos os “links”; 2 – um transmissor tem que estar disponível no nó origem, um receptor tem que estar disponível no nó destino e ambos devem estar sintonizados nos comprimentos utilizados nos “links” inicial e final, respectivamente. O bloqueio irá ocorrer se uma dessas condições não for atendida.

As redes WDM têm sido bastante estudadas [1-5], com foco principal direcionado para as redes sem conversão de comprimentos de onda. Muitos estudos têm se voltado para o bloqueio gerado nas redes por falta apenas de comprimentos de onda, não se importando com a situação dos transceptores presentes nos nós. Quando isto acontece, os resultados assumem que existem transceptores suficientes em todos os nós para suportarem todos os caminhos ópticos provenientes de requisições que não foram bloqueadas pela rede. Se W é

o “pool” de comprimentos de onda (número de comprimentos de onda na rede), assumindo ser este igual à carga máxima da fibra, e Δ o grau nodal de entrada-e-saída (“out-and-in”), no mínimo $W\Delta$ transceptores serão necessários para suportar esta hipótese estudada.

Os equipamentos eletrônicos devem concentrar maior parte dos custos da rede no futuro, visto que os custos destes tendem a cair mais vagorosamente que os custos de equipamentos da fotônica [6].

Desde que os transceptores são responsáveis por grande parte dos custos dos nós (e da rede em geral), a seleção do número de comprimentos de onda da ordem de dezenas a centenas faz com que esta suposição não seja real. Portanto, projetar uma rede com número suficiente de transceptores de modo que o bloqueio não seja gerado pelos nós é uma opção não muito eficiente, visto que os transceptores podem ficar inativos e inoperantes por um bom tempo. Isto é um motivo para investigar o comportamento do bloqueio de redes WDM com o número limitado de transceptores por nó.

1.2 – Proposta da pesquisa

Considere que uma requisição pode ser bloqueada na rede por causa de fatores inerentes aos nós (transceptores) ou à rede (comprimentos de onda), conforme visto no item 1.1. Interpretando 0 como sendo um número limitado de elementos e 1 como sendo um número ilimitado de elementos, a Tabela I mostra, de uma maneira geral, as configurações que podem ser assumidas pela rede.

	Nós	Rede	
Estudados	0	0	← Limitantes
nesta	0	1	
dissertação	1	0	
	1	1	

0 – limitado
1 – ilimitado

Tabela I

A configuração 0 0 indica que os nós e a rede apresentam características limitadas, ou seja, que os números de transceptores e comprimentos de onda são limitados na rede. A configuração 0 1 indica que o número de transceptores na rede é limitado e o número de comprimentos de onda é ilimitado. Esta é uma condição não-real, onde o resultado encontrado indica o melhor resultado (limitante inferior da probabilidade de bloqueio) que a rede pode apresentar quando o número de transceptores é limitado. A configuração 1 0, da mesma maneira, indica uma rede com limitação apenas no número de comprimentos de onda, considerando o número de transceptores tendendo a infinito. Esta é uma outra situação não-real, a qual também revela resultado de limitação inferior da probabilidade de bloqueio sob outro aspecto. E, finalmente, a configuração 1 1 representa uma situação totalmente não-real, onde não haverá bloqueio na rede, visto que os números de transceptores e comprimentos de onda são ilimitados.

De fato, o foco principal desta dissertação está referenciado às configurações 0 0 e 0 1, onde o estudo das redes WDM é realizado considerando em todos os casos o número de transceptores limitado, podendo o número de comprimentos de onda ser limitado ou não (limitante inferior). Estes estudos estão realizados nos capítulos 4 e 5, respectivamente. O objetivo é mostrar como a variação dos números de transceptores e comprimentos de onda utilizados na rede influencia o desempenho da mesma.

No capítulo 2, é apresentada uma rápida explanação sobre a evolução das redes ópticas, bem como o funcionamento básico do meio utilizado em comunicações ópticas: a fibra óptica.

No capítulo 3 as redes WDM se encontram como assunto principal, onde seus principais elementos e configurações são analisados. Os anéis WDM também ganham destaque devido à sua importância para as redes WDM.

Nos capítulos 4 e 5 se encontra a contribuição principal desta dissertação, como comentado anteriormente.

No capítulo 6 algumas conclusões finais e comentários são feitos.

2 – Evolução das redes ópticas

Este capítulo faz a apresentação de alguns conceitos básicos. O mesmo está dividido em dois itens. O primeiro item, o qual é denominado “Tecnologia”, define alguns conceitos básicos referentes ao meio de transmissão utilizado nas comunicações ópticas: a fibra óptica. E o segundo item, “Breve histórico”, relata um histórico das comunicações ópticas.

2.1- Tecnologia

As comunicações ópticas fazem uso da luz para transmitir informações através das fibras ópticas. Estas são formadas de sílica (vidro), e são utilizadas como guias de onda para propagação da luz. A fibra óptica é constituída de núcleo, casca e uma camada superior protetora podendo ser plástico [7]. A Figura 2.1 mostra sua formação básica.

A luz trafega a uma velocidade de aproximadamente $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, no ar. Sabe-se que:

$$c = \lambda \cdot f,$$

onde c representa a velocidade da luz, λ o comprimento de onda e f a frequência da mesma.

Dentro da fibra podemos considerar que esta velocidade fica limitada a c/n , onde n é o índice de refração efetivo da fibra, sempre inferior ao maior índice de refração do núcleo e superior ao da casca.

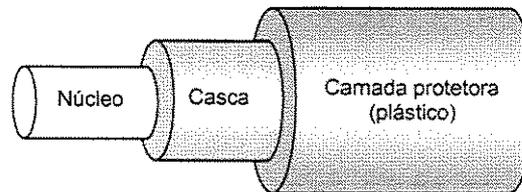


Figura 2.1 - Fibra óptica constituída de núcleo, casca e uma camada protetora que pode ser feita de plástico.

Para haver guiamento da luz dentro da fibra óptica são necessárias duas condições básicas: reflexão total da luz e interferência exatamente construtiva.

De fato, a luz é injetada no núcleo e sofre reflexões consecutivas. Para isso acontecer, é necessário que o índice de refração do núcleo seja maior que o da casca. Pode-se distinguir dois tipos de fibra quanto a variação do índice de refração do núcleo para a casca. O primeiro tipo é chamado de fibra de índice degrau, a qual é formada por núcleo e casca com índices de refração definidos e diferentes entre si. O segundo tipo é chamado de fibra de índice gradual, onde o índice de refração assume valores decrescentes do núcleo para a casca [8]. O valor de perdas para o último caso tipicamente excede 50 dB/km, sendo considerado um valor muito alto.

A Figura 2.2 mostra a relação entre os índices de refração para fibras de índice degrau e índice gradual.

Na Figura 2.3 pode-se ver a representação de uma fibra de índice degrau. O raio, já incidente no núcleo, forma um ângulo ϕ com a normal no ponto de incidência na parede de interface entre o núcleo e a casca. Raios com ângulos ϕ maiores que o ângulo crítico ϕ_c serão refletidos no próprio núcleo. O ângulo α representa o ângulo formado entre o raio refratado e a normal no ponto de incidência.

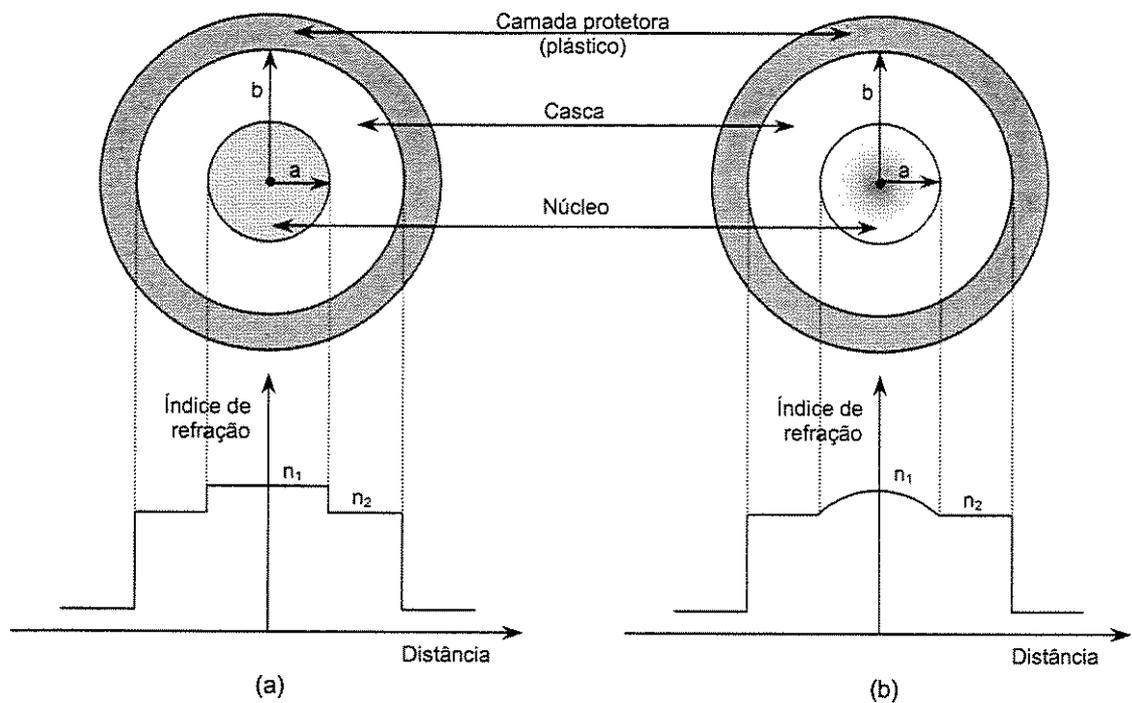


Figura 2.2 – Corte transversal de fibras ópticas de índice: (a) degrau e (b) gradual.

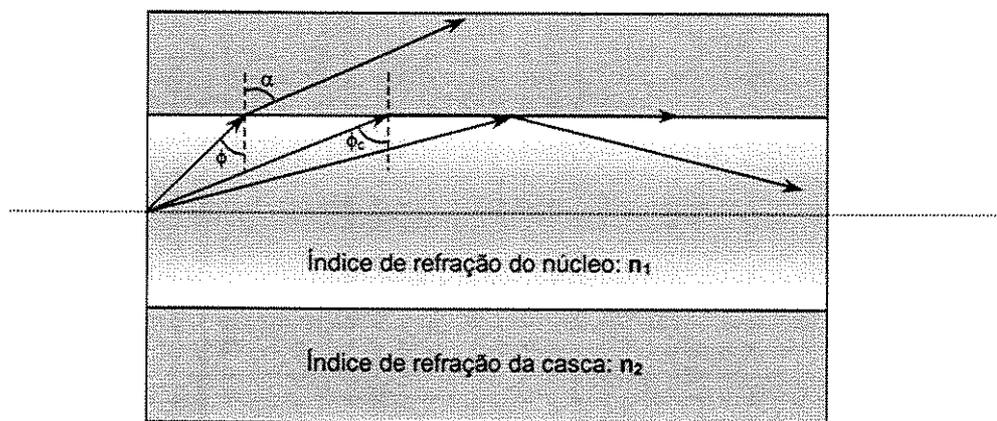


Figura 2.3 – Confinamento da luz através da reflexão interna total na fibra de índice degrau.

Sob o ponto de vista da óptica geométrica, a lei de Snell informa que:

$$n_1 \cdot \sin \phi = n_2 \cdot \sin \alpha$$

onde n_1 e n_2 representam os índices de refração do núcleo e da casca, respectivamente.

Quando o ângulo ϕ se torna crítico (ϕ_c), isto representa dizer que o ângulo $\alpha=90^\circ$. Daí, tem-se que:

$$\text{sen } \phi_c = n_2/n_1,$$

encontrando-se assim o valor de ϕ_c .

Sabe-se que a óptica geométrica é um tanto limitada para descrever o processo de propagação da luz na fibra óptica. Porém, através de um estudo mais aprofundado, sabe-se que grande parte da potência da luz é propagada na casca da fibra.

Os raios, por possuírem fases diferentes, podem se interferir de uma maneira construtiva ou destrutiva. Porém, para propagação da luz na fibra, esta interferência não pode ser destrutiva.

Uma outra característica das fibras trata do modo como a luz é propagada dentro das mesmas. As Figuras 2.4(a) e 2.4(b) mostram os modos de propagação multimodo e monomodo, respectivamente [7].

Na propagação multimodo vários modos são propagados ao mesmo tempo dentro da fibra óptica, onde muitos sinais percorrem diferentes caminhos. Na fibra monomodo a propagação se dá com transmissão de apenas um modo, numa propagação de caminho direto.

Um dos fatores importantes referentes à fibra diz respeito às perdas por ela apresentadas. A Figura 2.5 mostra um gráfico relativo às perdas encontradas na fibra monomodo [8]. Percebe-se que vários fatores contribuem para esta degradação. Contudo, o fator mais influente é a absorção material devido a presença de íons OH^- . Nota-se que a região próxima a $1,55 \mu\text{m}$ apresenta menor valor de perda. Num novo tipo de fibra, chamado fibra seca (“dry fiber”), pode-se perceber a redução de íons OH^- , de modo que o pico situado em torno de $1,39 \mu\text{m}$ praticamente desaparece.

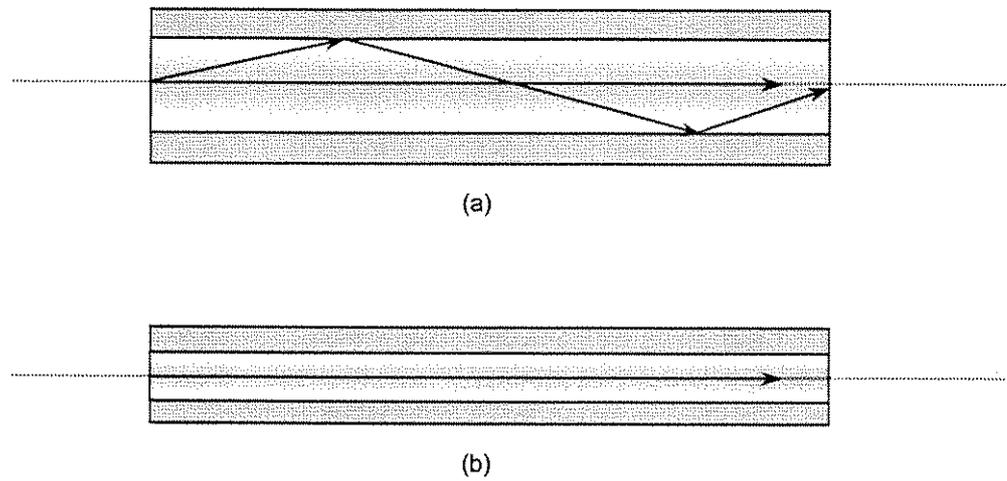


Figura 2.4 – (a) - Fibra multimodo, onde raios percorrem diferentes caminhos; (b) - Fibra monomodo, onde apenas caminhos diretos se propagam na fibra.

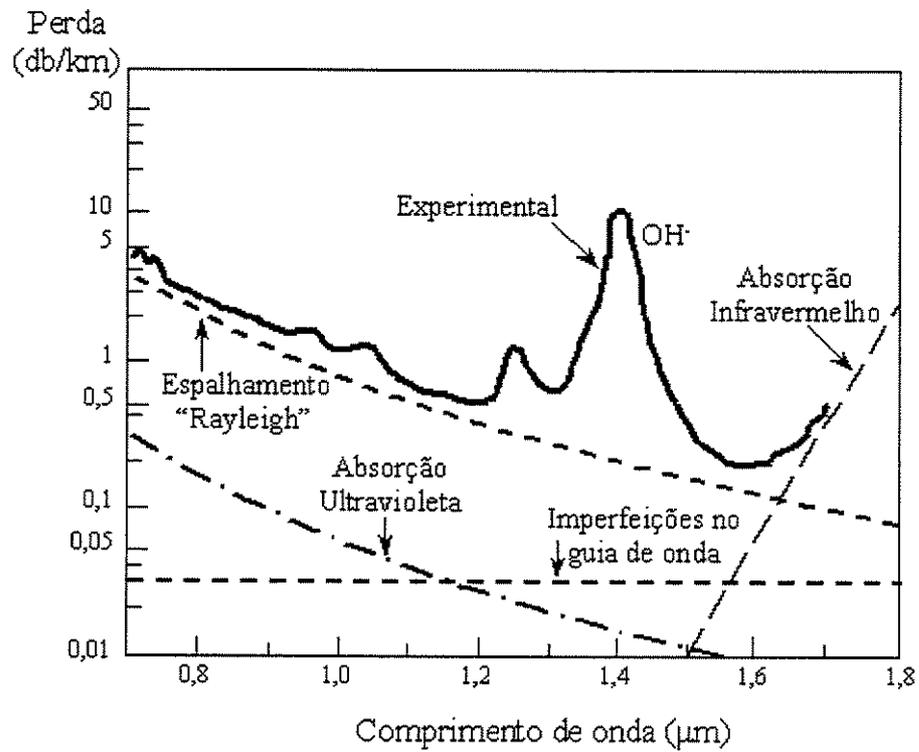


Figura 2.5 – Fatores causadores de perdas nas fibras.

Vários sinais percorrem caminhos diferentes dentro do núcleo das fibras multimodo. Uma consequência disto é o aparecimento da dispersão intermodal, entre modos, sendo o fator mais influente na dispersão total da fibra multimodo. A Figura 2.6 mostra um exemplo básico onde a dispersão do sinal está presente. Um sinal de duração T é injetado na fibra e em sua saída este mesmo sinal apresenta uma duração de $T + \Delta T$.

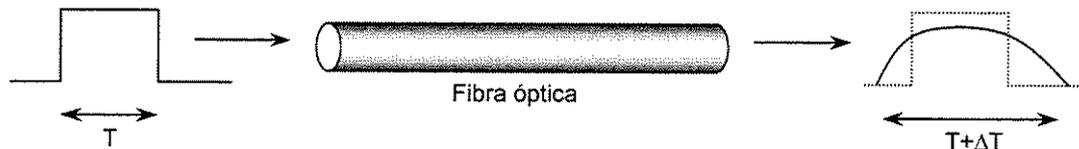


Figura 2.6 – Dispersão na fibra óptica.

Os valores de dispersão para a fibra monomodo são menores que os da multimodo. Os fatores que mais influenciam na dispersão total na fibra monomodo são a dispersão material, onde a sílica apresenta uma pequena variação no índice de refração para cada frequência, e dispersão por guia de onda, devido à construção da fibra.

A Figura 2.7 mostra um gráfico onde a dispersão é analisada em conjunto com os comprimentos de onda utilizados na fibra [8].

Nota-se que para a fibra de sílica padrão o ponto de dispersão zero se encontra nas proximidades de $1,3 \mu\text{m}$. Porém, como foi visto anteriormente, a região em torno de $1,55 \mu\text{m}$ é onde se encontram os menores valores de perdas na fibra. Portanto, para se obter um melhor desempenho, pode-se deslocar o ponto de menor dispersão na fibra para a região de $1,55 \mu\text{m}$, visto que a dispersão está relacionada fortemente à fabricação da fibra e ao material utilizado, podendo ser alterados para realização deste deslocamento. Fibras com estas características são chamadas de fibras de dispersão deslocada. A curva de dispersão para as fibras com dispersão plana pode ser vista na Figura 2.7. Para diminuir alguns efeitos não-lineares presentes na fibra, como o FWM (“Four Wave Mixing” – mistura de quatro ondas), necessita-se de um valor pequeno de dispersão. Daí, fibras com estas características podem ser chamadas de fibras de dispersão deslocada não-zero (“non-zero dispersion shifted fibers”), ou fibras NZDS.

Atualmente as fibras multimodo praticamente não estão sendo mais fabricadas, sendo as fibras monomodo as de grande influência atual no mercado.

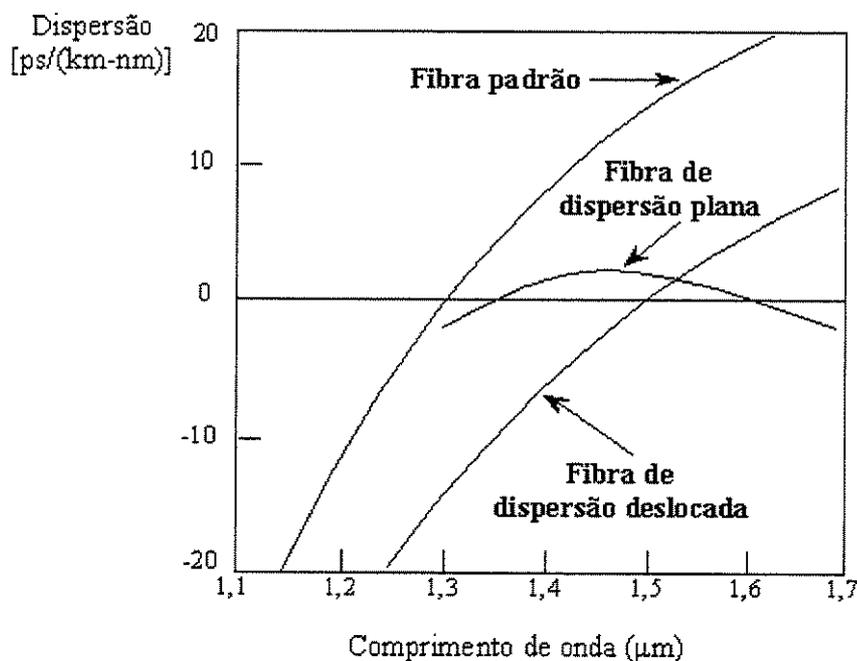


Figura 2.7 – A fibra padrão apresenta o ponto de dispersão zero na região de 1,3 μm. A fibra de dispersão deslocada apresenta o ponto de dispersão zero na região de 1,55 μm.

2.2 – Breve histórico

O uso da luz com propósitos de comunicações era utilizado desde os tempos antigos, porém não fazendo uso de fibras ópticas como guias de onda, como hoje em dia. Muitas civilizações antigas utilizavam espelhos, faróis de fogo ou sinais de fumaça para transmitir algum tipo de informação [8].

O primeiro chamado ‘telégrafo óptico’ foi posto em funcionamento entre as cidades de Paris e Lille em julho de 1794. Em 1830 esta ‘tecnologia’ se expandiu por toda a

Europa. O papel da luz era fazer com que os sinais se tornassem visíveis e fossem captados por estações intermediárias.

Em termos atuais, pode-se dizer que estes sistemas tinham taxa de transmissão de bits muito pequena, com valor inferior a 1 bit por segundo ($B < 1 \text{ b/s}$).

O surgimento da telegrafia propriamente dita se deu na década de 1830, quando se iniciou a era das comunicações elétricas. O surgimento do telefone, por volta de 1876, propiciou o surgimento de técnicas analógicas que dominariam as comunicações por cerca de um século. O surgimento de redes telefônicas durante o século 20 conduziu ao surgimento de algumas inovações nos sistemas de comunicações, como o cabo coaxial, o qual teve seu primeiro sistema posto em serviço em 1940. Porém, algumas de suas limitações propiciaram o surgimento de sistemas de comunicações com microondas, onde uma portadora fazendo uso de frequência situada na faixa de 1-10 GHz era usada para transmitir sinais utilizando algumas técnicas de modulação. O primeiro sistema de microondas foi posto em funcionamento em 1948, o qual utilizava uma frequência de 4 GHz como portadora.

Desde então, ambos sistemas com cabo coaxial e microondas evoluíram consideravelmente, chegando a operar em torno de 100 Mb/s. O mais avançado sistema de cabo coaxial foi colocado em serviço em 1975 operando numa taxa de 274 Mb/s. Uma grande desvantagem de sistemas com cabo coaxial é a curta distância (em torno de 1 km) entre repetidores, o que faz o sistema se tornar um tanto caro. Sistemas com microondas possuem distância maior entre repetidores, porém suas limitações se encontram na taxa de transmissão.

Um termo bem comum em sistemas de comunicações é o produto taxa-distância, BL, onde B é a taxa de bits e L representa a distância entre repetidores/regeneradores. A Figura 2.8 mostra como o produto BL tem crescido ao longo de avanços tecnológicos durante cento e cinquenta anos. Sistemas de comunicações com BL aproximadamente igual a 100 (Mb/s)-km se tornaram disponíveis em 1970.

Percebeu-se, na metade do século 20, que um grande aumento no produto BL seria possível se ondas ópticas fossem usadas como portadoras. O surgimento do laser e sua demonstração em 1960 despertaram a atenção para o confinamento da luz.

Em 1966 foi sugerido que as fibras ópticas seriam a melhor opção porque elas eram capazes de guiar a luz de maneira similar como os elétrons no fio de cobre. As altas perdas nas fibras eram o principal problema. Fibras disponíveis na década de 1960 tinham perdas em torno de 1000 dB/km. Um grande salto ocorreu em 1970 quando as perdas puderam ser reduzidas para 20 dB/km na região de comprimentos de onda em torno de 1 μm [8]. As disponibilidades simultâneas de fontes ópticas compactas e baixa perda na fibra conduziram a um esforço para o desenvolvimento de sistemas de comunicações com fibras ópticas.

A Figura 2.9 mostra o crescimento da taxa de transmissão de sistemas ópticos durante algumas gerações. Pode-se perceber que o desenvolvimento comercial com sistemas ópticos acompanhou a área de pesquisa bem próximo. O progresso foi rápido devido a um aumento no fator de cem mil na taxa de bits sobre um período menor que vinte e cinco anos. Como consequência, o produto BL de sistemas ópticos modernos pode exceder por um fator de dez milhões se comparados com sistemas ópticos de primeira geração.

A fase de pesquisa de sistemas de comunicações com fibra óptica praticamente se iniciou em 1975. Grandes progressos foram realizados no período de vinte e cinco anos, podendo esta fase ser dividida em algumas gerações, como mostra a Figura 2.10. Nesta figura observa-se o crescimento do produto BL ao longo dos anos. A linha em diagonal representa o produto BL assumindo valores que duplicam a cada ano. Para cada geração, percebe-se que o produto BL inicialmente apresenta um crescimento considerável e tende a uma saturação quando a tecnologia já se encontra mais madura.

A primeira geração de sistemas ópticos operou em torno de 0,8 μm e usava lasers semicondutores GaAs. Após diversas tentativas entre 1977 – 79, estes sistemas só se tornaram disponíveis comercialmente em 1980. Eles operavam a uma taxa de 45 Mb/s com espaços de até 10 km entre regeneradores. O aumento do espaço entre regeneradores, comparado com o dos sistemas com cabo coaxial que era de 1 km, motivou a continuação de pesquisa acerca desta tecnologia, visto que uma quantidade menor de regeneradores representava menor custo para construção da rede.

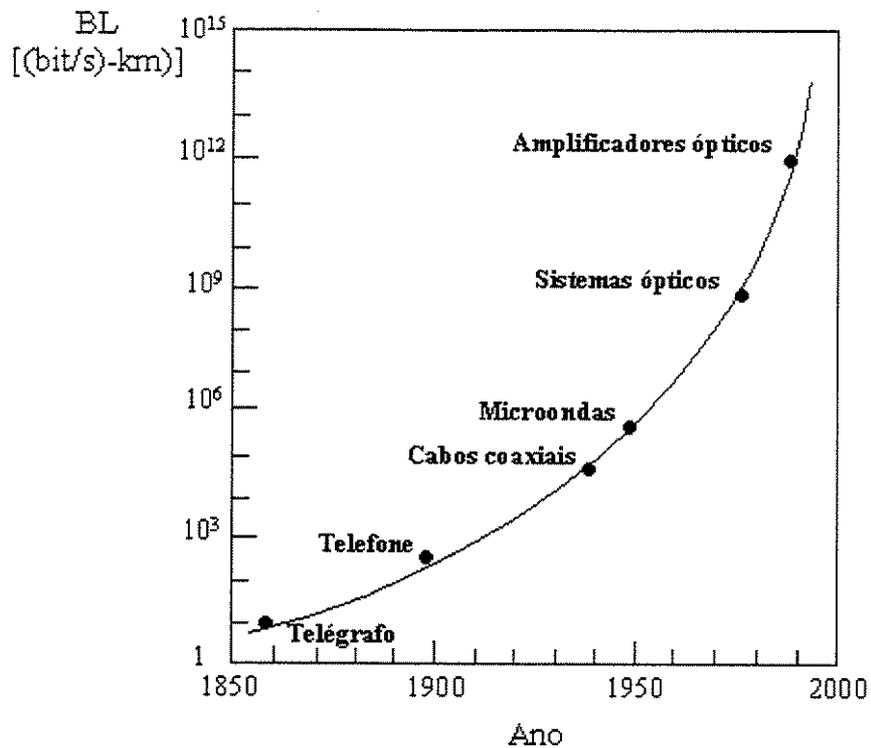


Figura 2.8 – Crescimento do produto BL ao longo de vários anos.

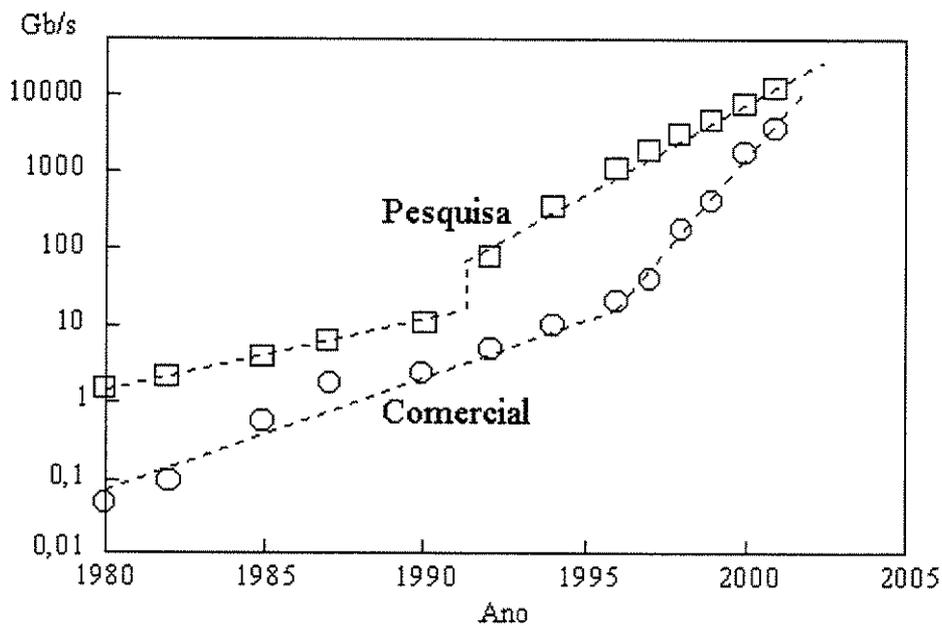


Figura 2.9 – Crescimento da taxa de transmissão nas áreas comercial e de pesquisa.

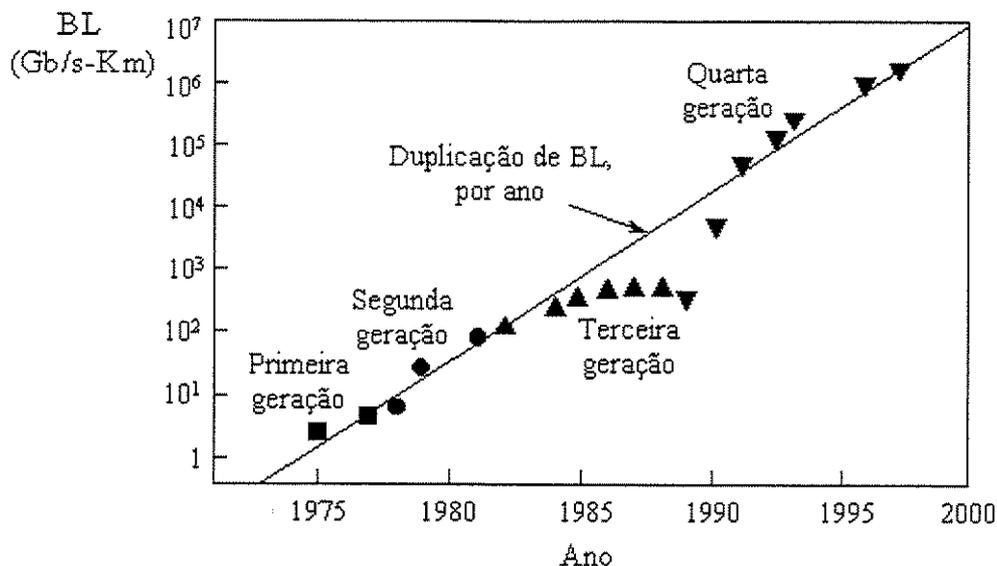


Figura 2.10 – Gerações dos sistemas ópticos.

O espaçamento entre regeneradores pôde ser aumentado quando os sistemas ópticos passaram a operar na região de comprimento de onda 1,3 μm , onde a perda na fibra é abaixo de 1 dB/km. Nesta mesma região constatou-se que a fibra apresenta o menor valor para dispersão. Estes fatos motivaram alguns esforços para o desenvolvimento de laser semicondutores InGaAsP operando na região de 1,3 μm . A segunda geração se tornou disponível no início dos anos 80, mas a taxa de bits nos primeiros sistemas era limitada, atingindo valores de 100 Mb/s, devido ao uso de fibras multimodo. Esta limitação foi superada com o uso de fibras monomodo. Em 1981 um laboratório realizou um experimento atingindo transmissão de 6 Gb/s sobre 44 km de fibra monomodo. Em 1987, os sistemas de segunda geração, operando a uma taxa de até 1,7 Gb/s com regeneradores espaçados de 50 km, tornavam-se comercialmente disponíveis.

O espaçamento entre regeneradores nos sistemas de segunda geração era limitado por causa das perdas na fibra na janela de 1,3 μm . As perdas se tornaram mínimas nas proximidades de 1,55 μm . De fato, perdas em torno de 0,2 dB/km eram encontradas em meados de 1979 nesta região espectral [9]. Contudo, a introdução de sistemas de terceira

geração operando em 1,55 μm encontrou problemas por causa da dispersão considerável em torno desta janela óptica. O problema de dispersão poderia ser solucionado ao serem utilizadas fibras de dispersão deslocada, levando o valor de dispersão zero da região de 1,3 μm para a região de 1,55 μm , ou utilizando lasers monomodo (“Single Longitudinal Mode”-SLM). Ambas as características foram utilizadas nos anos 80. Experimentos de laboratório indicavam a possibilidade de transmissão a uma taxa de até 4 Gb/s em distâncias de 100 km. Os sistemas de terceira geração a uma taxa de 2,5 Gb/s se tornaram disponíveis comercialmente em 1990. Estes sistemas eram capazes de operar até 10 Gb/s. Uma desvantagem dos sistemas de terceira geração ainda era a presença de regeneradores, que teriam de estar presentes a cada 60-70 km.

Os sistemas de quarta geração fazem uso do surgimento dos amplificadores ópticos para aumentar distância entre regeneradores e do WDM (“Wavelength Division Multiplexing”) para aumento da taxa de bits. O surgimento da tecnologia WDM iniciou uma revolução que resultou em duplicação da capacidade dos sistemas a cada seis meses e conduziu os sistemas a operarem a uma taxa de 10 Tb/s em 2001. Em muitos sistemas WDM as perdas nas fibras são compensadas periodicamente usando amplificadores a fibra dopada com érbio (EDFA – “Erbium-Doped Fiber Amplifier”) [10] a cada 60-80 km. Estes amplificadores foram desenvolvidos após 1985 e se tornaram disponíveis comercialmente em 1990. Em 1991 um experimento mostrou a possibilidade de transmissão de dados a uma taxa de 2,5 Gb/s sobre 21000 km, e sobre 14300 km a uma taxa de 5 Gb/s. Em 1996, não apenas transmissão sobre 11300 km a uma taxa de 5 Gb/s foi demonstrada usando cabos submarinos, mas também sistemas de cabos comerciais transatlânticos e transpacíficos se tornaram disponíveis. Desde então, um grande número de sistemas ópticos submarinos tem sido desenvolvido em todo o mundo.

A atenção do momento está voltada para o aumento de canais utilizando a tecnologia WDM. Com o aumento da largura de banda de sistemas WDM, torna-se impossível realizar a amplificação de todos os canais ao mesmo tempo utilizando um simples amplificador. Portanto, novas técnicas estão sendo exploradas na região de 1,45 a 1,62 μm .

Sistemas terrestres comerciais com capacidade de 1,6 Tb/s se tornaram disponíveis no final de 2000, com planos de extensão da capacidade para 6,4 Tb/s. Dado que o sistema

de primeira geração tinha capacidade de 45 Mb/s em 1980, percebe-se que a capacidade aumentou num fator maior que dez mil num período de vinte anos.

A quinta geração de sistemas ópticos está interessada na faixa de cobertura de comprimentos de onda que pode ser operada simultaneamente por sistemas WDM. Um novo tipo de fibra, chamada fibra seca (“dry fiber”) tem sido desenvolvida com o objetivo de fazer com que as perdas na faixa de 1,30 a 1,65 μm sejam menores. A disponibilidade destas fibras e novos métodos de amplificação podem conduzir os sistemas a operarem milhares de canais WDM na mesma fibra [8].

A Figura 2.11 mostra a evolução dos sistemas ópticos dando enfoque ao aspecto tecnológico [11].

De fato, durante os anos 70 a evolução da capacidade dos sistemas ópticos de comunicações esteve muito associada ao surgimento no mercado de novos tipos de fibra. Dos anos 80 à atualidade, porém, a evolução dos sistemas esteve determinada principalmente pelo progresso obtido nas fontes transmissoras [12].

Figura 2.11(a) mostra um LED (“Light Emitting Diode” - diodo emissor de luz) sendo usado como transmissor sobre uma fibra multimodo, com regeneradores separados por pequenos espaços. Na Figura 2.11(b) percebe-se o uso de lasers MLM (“Multi-Longitudinal Mode” – laser multimodo) sobre fibra monomodo, com regeneradores e operando a 1,3 μm . A Figura 2.11(c) mostra um sistema que utiliza um laser SLM (“Single-Longitudinal Mode” – laser monomodo) sobre uma fibra monomodo operando a 1,55 μm . Os regeneradores ainda estão presentes. Pode-se ver na Figura 2.11(d) o uso de laser SLM sobre uma rede WDM com amplificadores.

Apesar da tecnologia de comunicações ópticas ter em torno de vinte e oito anos, nota-se um rápido progresso, já tendo atingido um certo grau de maturidade em pouco tempo.

Portanto, as redes ópticas mais atuais e avançadas utilizam a tecnologia WDM com roteamento de comprimentos de onda, o que garante um alto grau de escalabilidade à rede. Estas redes serão vistas com mais detalhes nos próximos capítulos.

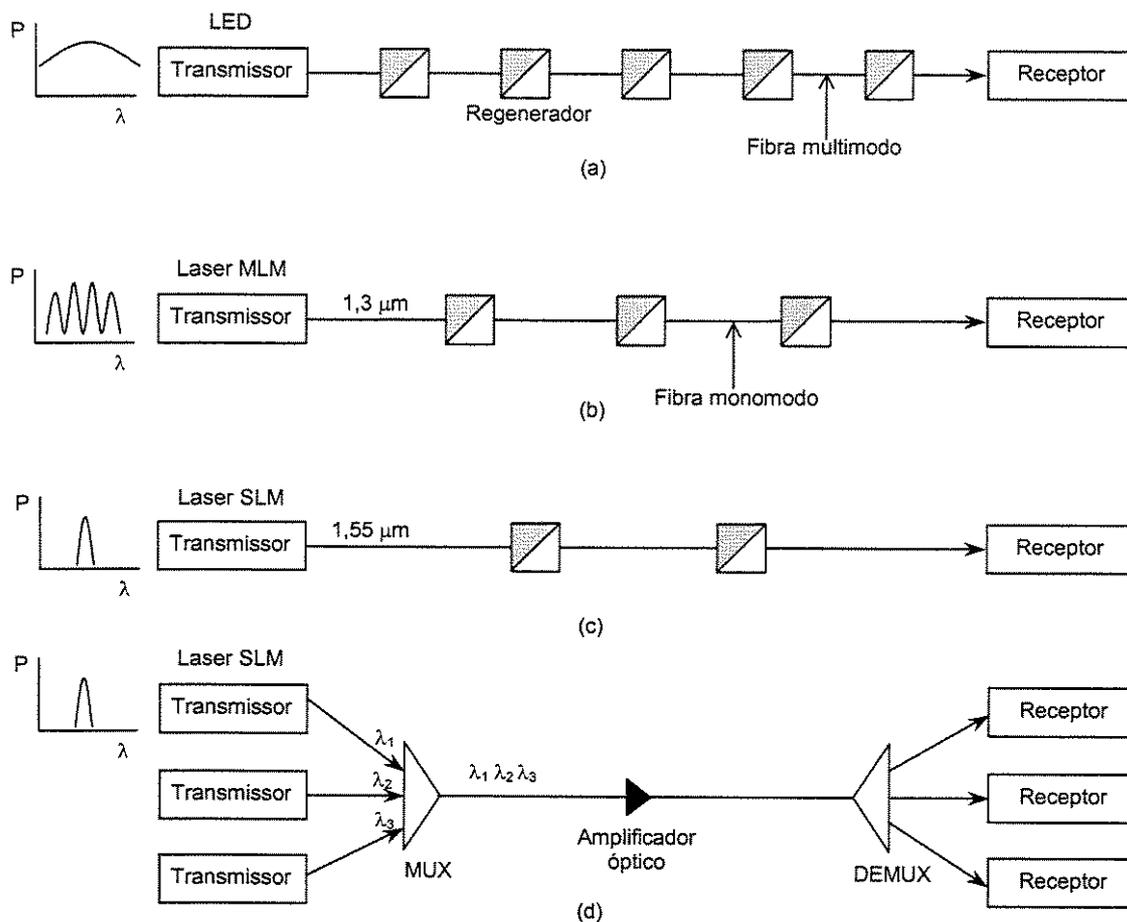


Figura 2.11 – Evolução dos sistemas de transmissão óptica. (a) – Sistemas iniciais usando LED em fibra multimodo. (b) - Laser MLM (“Multi Longitudinal Mode”) usado em fibra monomodo na faixa de 1,3 μm, para combater a dispersão intermodal. (c) - Laser SLM (“Single Longitudinal Mode”) usado em fibra monomodo na faixa de 1,55 μm. (d) - Sistema WDM sendo usado com amplificadores em lugar de regeneradores. As curvas P-λ indicam o espectro de potência do sinal enviado.

3 – Redes WDM

Estas redes provêm comutação de circuitos fim-a-fim através de caminhos ópticos (“lightpaths”) entre dois nós da rede [11]. Caminho óptico é aquele percorrido entre nós origem e destino por um ou mais comprimentos de onda. Caso a rede não implemente a facilidade de conversão de comprimentos de onda, o caminho óptico será constituído apenas de um comprimento de onda. Entende-se por nós origem e destino aqueles através dos quais o sinal óptico entra e sai da rede, respectivamente. O comprimento de onda é roteado dentre diversos nós até chegar ao seu destino. Esta facilidade de roteamento de comprimentos de onda se deve ao fato da existência de OXC’s (“Optical Crossconnects”) e por causa desta característica as redes WDM passaram a ser chamadas de redes com roteamento de comprimentos de onda (“wavelength-routing networks”). Porém, no início, as redes WDM não apresentavam esta facilidade, sendo necessário que todos os comprimentos de onda passassem ao domínio elétrico nos nós intermediários antes de se chegar ao seu destino. A Figura 3.1 ilustra redes com a atuação do sistema WDM antes do surgimento dos OXC’s e com a utilização dos mesmos.

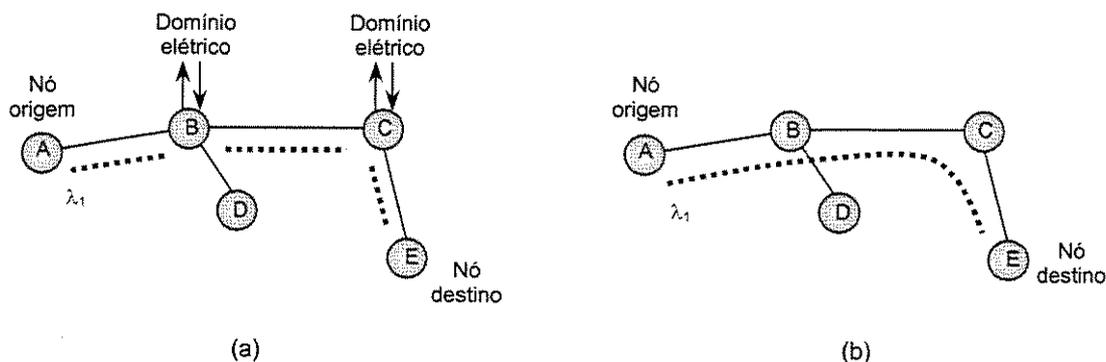


Figura 3.1 – Redes WDM: (a) sem OXC e (b) com OXC.

Uma requisição $A \rightarrow E$ é implementada nestas redes. Na Figura 3.1(a), sem o uso dos OXC's, em todos os nós intermediários o comprimento de onda alocado λ_1 será convertido para o domínio elétrico para em seguida voltar para a rede sob forma de sinal óptico. Observa-se a existência de três caminhos ópticos nesta rede. Já na Figura 3.1(b), com o uso de OXC's, o comprimento de onda pode ser roteado por nós intermediários até atingir o nó destino sem a necessidade de conversão para o domínio elétrico, utilizando apenas um caminho óptico e garantindo uma velocidade maior de conexão entre os nós.

As redes WDM (“Wavelength Division Multiplexing”) têm revolucionado os sistemas de comunicações por causa de sua alta capacidade de transmissão de dados. A técnica WDM multiplexa diversos comprimentos de onda numa mesma fibra. O mesmo comprimento de onda NÃO pode ser utilizado mais de uma vez na mesma fibra. Com o objetivo de padronizar as redes WDM de diversos fabricantes, a ITU (“International Telecommunications Union”) resolveu lançar uma grade de frequências utilizáveis para redes WDM. Esta grade pode ser visualizada na Figura 3.2, onde a partir da frequência central de 193.1 THz, outros canais espaçados entre si de 50 GHz podem ser alocados e utilizados.

Normalmente as frequências utilizadas em WDM são classificadas em bandas [11], que podem ser vistas na Tabela II.

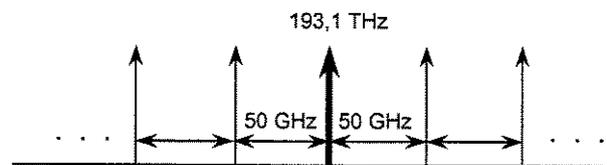


Figura 3.2 – Grade de frequências padronizada pela ITU para redes WDM.

Os sinais, ao serem transmitidos sobre a fibra, necessitam ser regenerados após uma certa distância percorrida, por causa de degradações presentes no transcorrer da rede. O uso de regeneradores é restrito para cada comprimento de onda e, devido ao seu custo elevado, ficaria inviável utilizar vários comprimentos de onda numa fibra. Com o surgimento dos amplificadores ópticos, estes pontos de regeneração dos sinais puderam ficar em distâncias

cada vez maiores. Na verdade os amplificadores ópticos não regeneram o sinal, mas dão ganho aos mesmos. E uma vantagem é que os amplificadores ópticos podem ser usados para todos os comprimentos de onda dentro de uma determinada faixa, não necessitando especificamente de um amplificador óptico para cada comprimento de onda.

<i>Banda</i>	<i>Descrição</i>	<i>Faixa de comprimento de onda (nm)</i>
O	“Original” - original	1260 - 1360
E	“Extended” - estendida	1360 - 1460
S	“Short” - curta	1460 - 1530
C	“Conventional” - convencional	1530 - 1565
L	“Long” - longa	1565 - 1625
U	“Ultra-long” - ultra-longa	1625 - 1675

Tabela II – Diferentes bandas de comprimentos de onda utilizados na fibra óptica.

O termo DWDM (“Dense Wavelength Division Multiplexing”) é utilizado para designar sistemas WDM que operam com mais de quarenta canais. O termo CWDM (“Coarse Wavelength Division Multiplexing”) é usado quando sistemas WDM utilizam até oito canais.

O descompasso entre as velocidades de processamento eletrônico e de transmissão óptica constitui o chamado gargalo eletrônico (“electronic bottleneck”) [13]. Contudo, cada canal ainda é limitado por técnicas de modulação eletrônica. Pode-se dizer que o valor para utilização comercial gira em torno de 10 Gb/s por canal, também encontrando-se canais de 40 GB/s.

De fato, por apresentarem grandes velocidades de transmissão de dados, as redes WDM têm servido como redes de suporte para outras redes, as quais são chamadas de redes clientes. A Figura 3.3 ilustra um roteador A da camada cliente IP que utiliza a rede óptica através de um caminho óptico (λ) para realizar conexão com o roteador B. A rede cliente pode ser formada por redes IP, ATM, SDH/SONET, dentre outras.

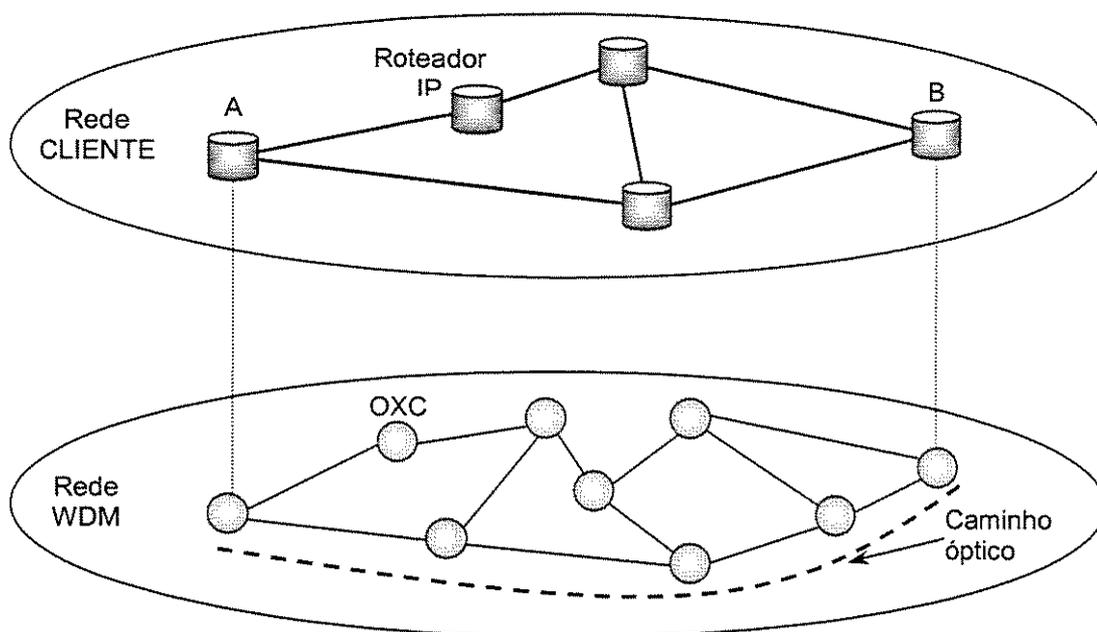


Figura 3.3 – Rede cliente IP utilizando a camada óptica para efetuar a conexão do roteador A com roteador B. O caminho óptico utiliza um comprimento de onda (λ) o qual é roteado nos nós intermediários até chegar ao destino. Não há conversão de comprimentos de onda.

O item 3.1, “Elementos de uma rede WDM”, relata algumas características importantes dos elementos de uma rede WDM atual. Algumas configurações e exemplos de redes WDM podem ser vistos no item 3.2, “Configurações de redes WDM”. O item 3.3, “Anéis WDM”, descreve alguns detalhes das redes WDM em anel, configuração esta bem utilizada.

3.1- Elementos de uma rede óptica WDM

São estudados neste item os elementos básicos que compõem uma rede WDM. É importante o conhecimento dos mesmos para que o entendimento desta rede seja de melhor compreensão. Vale salientar que os mesmos estão presentes em redes WDM com configurações em anel, malha (“mesh”) ou configurações que mesclam as duas anteriores.

3.1.1- “Optical Line Terminal” (OLT)

Os OLT's são usados nas extremidades de “links” em conexões ponto-a-ponto, multiplexando e demultiplexando os comprimentos de onda utilizados na rede [11]. Elementos como “transponders” e multiplexadores/demultiplexadores (MUX's/DEMUX's) de comprimentos de onda estão presentes no OLT. Já os amplificadores ópticos podem ou não estar contidos no mesmo. A Figura 3.4 mostra a configuração básica do OLT, sem a presença de amplificador óptico.

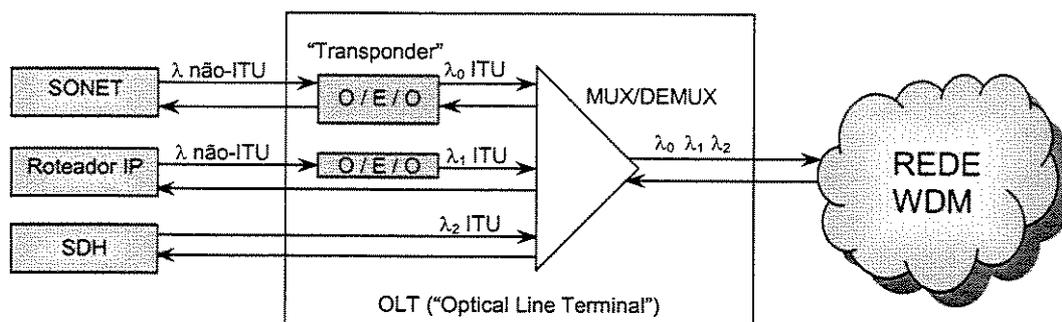


Figura 3.4 - Configuração básica de um OLT. “Transponders” recebem sinal óptico não-padronizado da rede cliente, converte-o em sinal elétrico, e novamente o transforma em sinal óptico num comprimento de onda e formato padronizados pela rede WDM.

O “transponder” OEO (óptico-elétrico-óptico) é um transceptor que recebe sinal óptico (num determinado comprimento de onda), converte-o em sinal elétrico e em seguida o transforma em sinal óptico novamente, porém num comprimento de onda possivelmente diferente do inicial. Portanto, pode-se perceber na Figura 3.4 que a função do transponder é converter o comprimento de onda não padronizado proveniente da rede cliente (como IP, SONET/SDH, etc.) em comprimento de onda padronizado e utilizado pela rede, como o padrão ITU (“International Telecommunications Union”). A utilização do mesmo pode ser dispensada quando o comprimento de onda utilizado pela rede cliente está no mesmo padrão adotado pela rede óptica.

Os “transponders” podem ser fixos, os quais emitem e recebem em um comprimento de onda específico, ou sintonizáveis, que podem emitir e receber em qualquer comprimento de onda presente na rede. De fato, na prática, existe um grupo de comprimentos de onda os quais podem ser utilizados pelos “transponders” sintonizáveis. Os “transponders” são elementos que apresentam maior influência no que diz respeito aos custos numa rede óptica, de modo que a redução/otimização de seu uso na rede diminui consideravelmente o custo total de implementação da mesma.

Os MUX's (multiplexadores) são responsáveis pela multiplexação dos comprimentos de onda que serão inseridos em uma única fibra óptica e os DEMUX's (demultiplexadores) são responsáveis pela demultiplexação destes comprimentos de onda.

Os amplificadores ópticos podem estar presentes num OLT com o objetivo de fazer a amplificação do sinal. Os mais usados são o SOA (“Semiconductor Optical Amplifier”), baseado na construção de amplificadores com material semicondutor, e o EDFA (“Erbium-Doped Fiber Amplifier” – amplificador a fibra dopada com érbio), o qual utiliza o érbio para dopar fibras, visto que este gás emite radiação numa frequência dentro da janela óptica de 1550 nm.

3.1.2- “Optical Add/Drop Multiplexer” (OADM)

Considere uma rede linear com três nós (A, B e C), como mostra a Figura 3.5, onde conexões A-B, B-C e A-C são requisitadas sendo atendidas com um, um e dois comprimentos de onda, respectivamente. Considere a rede a duas fibras, com conexões unidirecionais em cada uma.

A Figura 3.5 mostra a implementação da rede para atender as conexões solicitadas com o uso apenas de OLT's. O tráfego A-C passa direto através do nó B, não realizando acréscimo/retirada (“add/drop”) de comprimentos de onda no nó especificado. Na Figura 3.5(a) percebe-se que todos os terminais do MUX e DEMUX do nó B utilizam “transponders”. Uma maneira de otimizar os custos seria fazer todo o tráfego passante atravessar o nó B diretamente do MUX para o DEMUX, sem uso de “transponders”, sendo estes utilizados apenas nos terminais necessários para se fazer o “add/drop”, como mostra a

Figura 3.5(b). Pode-se chamar OADM a esta configuração caracterizada no nó B da Figura 3.5(b).

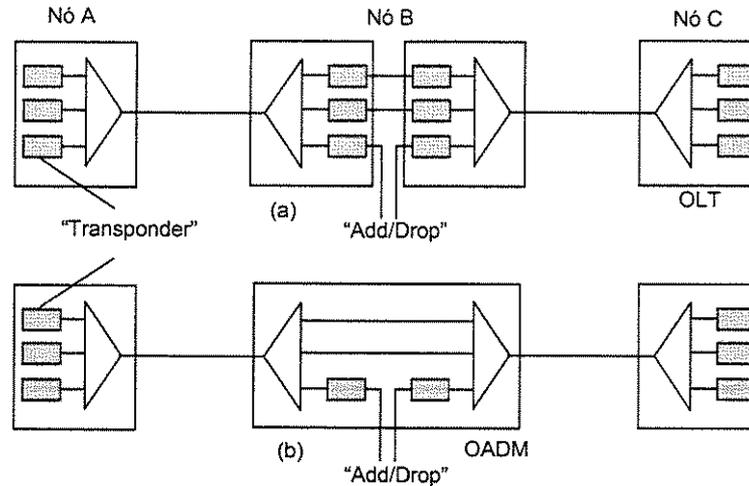


Figura 3.5 - Rede linear composta por OLT's com "transponders". (a) - "Transponders" são utilizados em todos os terminais do OLT. (b) - Otimização do número de "transponders".

Existem diferentes arquiteturas OADM's, podendo estas ser reconfiguráveis ou não-reconfiguráveis [11]. O fator reconfigurabilidade indica que os canais que realizam "add/drop" e os canais passantes pelo nó podem ser selecionados remotamente através de software.

Algumas arquiteturas de OADM's não-reconfiguráveis podem ser vistas na Figura 3.6. Nestas arquiteturas a seleção dos canais que irão realizar acréscimo/retirada de comprimentos de onda e daqueles que irão passar através do próprio nó é feita manualmente no local.

A Figura 3.6(a) mostra a arquitetura paralela, onde todos os comprimentos de onda são demultiplexados, sendo que uma parte deles realiza "add/drop" e a outra segue diretamente para o próximo MUX.

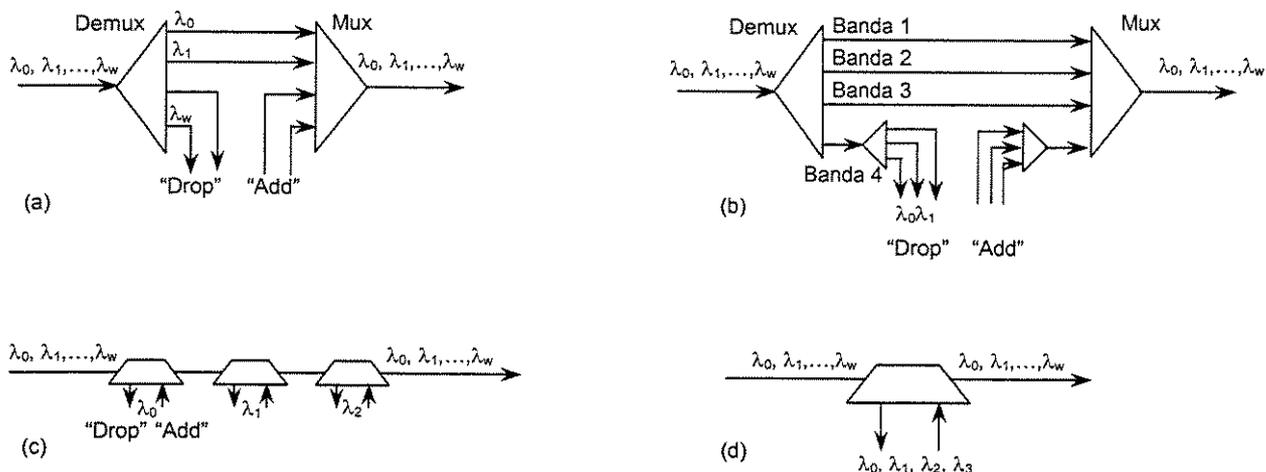


Figura 3.6 - Arquiteturas de OADM's não-reconfiguráveis. (a) - Arquitetura paralela. (b) - Versão modular para a arquitetura paralela. (c) - Arquitetura serial. (d) - Arquitetura "band drop".

A Figura 3.6(b) mostra uma versão modular da arquitetura paralela, onde bandas de comprimentos de onda são levadas em consideração. Cada banda pode ser formada por um conjunto qualquer de comprimentos de onda. As bandas são demultiplexadas e após isso os comprimentos de onda da banda de interesse também são demultiplexados para serem retirados ("drop") da rede. O processo inverso é realizado para o caso da multiplexação. As vantagens desta última em relação à primeira são: 1- menor custo, visto que realiza menor quantidade de multiplexações/demultiplexações, e 2- menor perda óptica para os sinais passantes em banda. Porém, só é permitida a realização de "add/drop" para todos os comprimentos de onda pertencentes à banda.

A arquitetura serial é mostrada na Figura 3.6(c), onde os OADM's podem realizar "add/drop" em apenas um comprimento de onda por vez. Estes são chamados SC-OADM's ("Single-Chanel" OADM's).

A Figura 3.6(d) mostra a arquitetura "band drop", onde um grupo específico de comprimentos de onda pertencentes à uma banda é retirado e acrescentado conjuntamente.

A utilização da arquitetura serial é indicada apenas quando poucos comprimentos de onda são acrescentados/retirados da rede, visto que seu uso insere uma perda nos

comprimentos de onda passando pelo nó. Sua utilização para um grande número de “add/drop” no nó resulta em alto custo e inserção de perdas consideráveis. Portanto, antes de se fazer a implementação de alguma das arquiteturas expostas, deve-se analisar o cenário onde as mesmas serão utilizadas para se chegar a uma aplicação mais adequada de acordo com a necessidade da rede.

As arquiteturas de OADM's reconfiguráveis podem ser vistas na Figura 3.7.

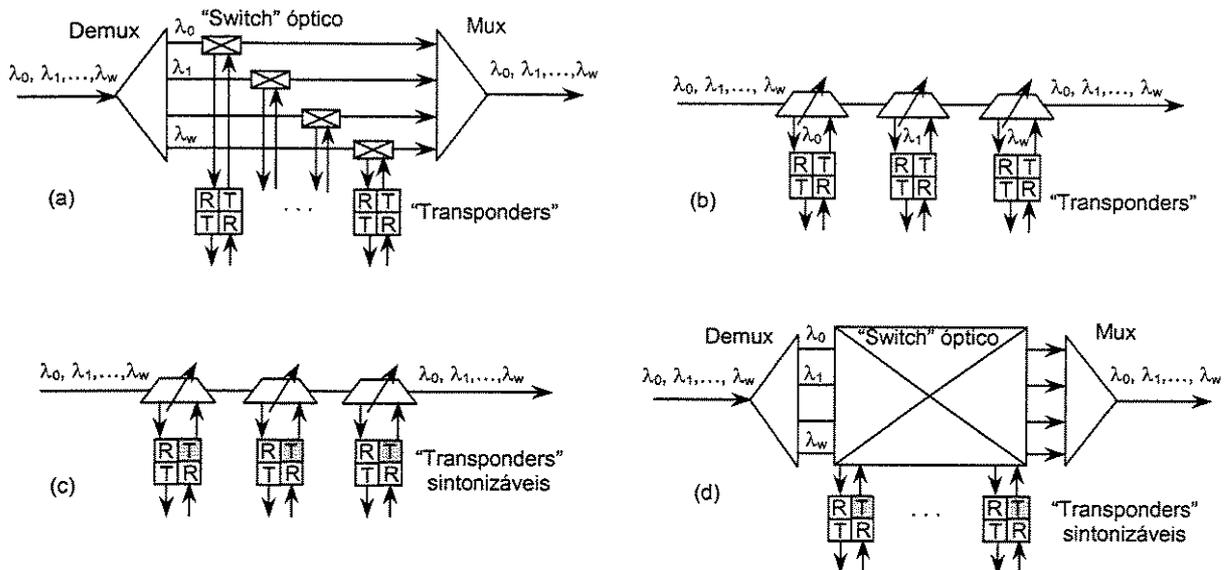


Figura 3.7 - Arquiteturas de OADM's reconfiguráveis. (a) – OADM com arquitetura paralela, parcialmente sintonizável. (b) – OADM com arquitetura serial parcialmente sintonizável. (c) e (d) - OADM's totalmente sintonizáveis. T em negrito significa que os “transponders” são sintonizáveis.

A Figura 3.7(a) mostra um OADM que usa arquitetura paralela com “switches” ópticos, o qual apresenta uma característica de sintonizabilidade parcial, visto que os “transponders” utilizados possuem transmissores fixos e o OADM é reconfigurável. Os comprimentos de onda selecionados para realizar “add/drop” percorrerão os “transponders” em direção à rede cliente e os demais serão direcionados diretamente para o MUX. Percebe-se a existência de “transponders” para cada comprimento de onda presente na rede, o que torna o sistema de custo elevado.

Um OADM parcialmente sintonizável com arquitetura serial é mostrado na Figura 3.7(b). O OADM pode selecionar qualquer comprimento de onda, mas os “transponders” têm que trabalhar com um comprimento de onda específico/fixo. Isso faz com que um planejamento antecipado seja realizado para que os “transponders” fixos sejam implementados corretamente de acordo com seus respectivos comprimentos de onda.

OADM's totalmente sintonizáveis são mostrados nas Figuras 3.7(c) e 3.7(d). A Figura 3.7(c) mostra um OADM que utiliza arquitetura serial e “transponders” sintonizáveis, onde remotamente pode-se escolher qual comprimento de onda será retirado e inserido na rede. Um OADM totalmente sintonizável utilizando uma arquitetura paralela é mostrado na Figura 3.7(d). Percebe-se a presença de um “switch” óptico, onde qualquer comprimento de onda pode realizar “add/drop” ou passar direto através do mesmo. Esta característica permite um caráter de alta flexibilidade à rede. O “switch” óptico é o OXC (“Optical Crossconnect”), que é estudado no item posterior.

3.1.3- “Optical Crossconnect” (OXC)

Os OXC's são elementos muito usados em redes WDM com alto grau de complexidade, como redes em malha com diversos comprimentos de onda, etc. Um exemplo de utilização de um OXC é mostrado na Figura 3.8, onde OLT's e equipamentos cliente, como IP, SONET/SDH, ATM, são conectados diretamente ao OXC.

O OXC implementa alguns serviços importantes, tais como:

- * roteamento de comprimentos de onda dentro de seus “switches”, propiciando um caráter de escalabilidade à rede;
- * conversão de comprimento de onda, permitindo com que comprimentos de onda sejam convertidos em outros para que possam trafegar sem bloqueio no “link” seguinte;
- * “grooming” (entende-se por “grooming” como sendo a agregação de sinais de baixas velocidades para compor sinal de alta velocidade);
- * proteção e restauração, podendo detectar falhas na rede e re-rotear caminhos ópticos, dentre outros.

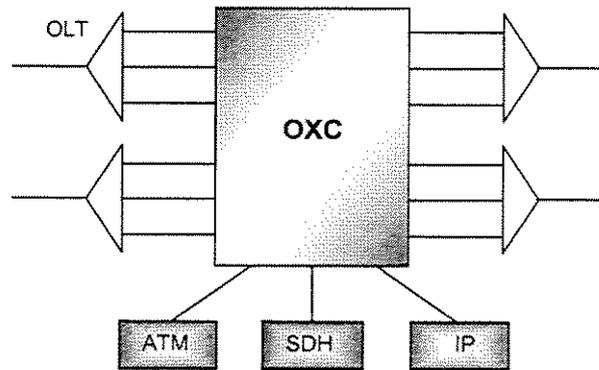


Figura 3.8 - OXC sendo usado com OLT's e em interface com redes clientes como ATM, SDH, e IP.

Algumas configurações do OXC são mostradas na Figura 3.9. As três primeiras configurações são do tipo opaca, pois o sinal óptico é convertido para o domínio elétrico ao atravessar o nó, e a última é chamada configuração “all-optical”, pois todo o sinal é trabalhado no domínio óptico [11].

Um OXC com núcleo elétrico pode ser visto na Figura 3.9(a), onde os transceptores utilizados no OXC são do tipo OE (óptico-elétrico) e EO (elétrico-óptico), e os que se situam conectados diretamente aos OLT's são do tipo OEO.

As Figuras 3.9(b), (c) e (d) mostram o OXC com núcleo óptico. A configuração que utiliza “transponders” do tipo OEO que fazem interface direta com o núcleo óptico, dentro do OXC, e com os OLT's está caracterizada na Figura 3.9(b).

A Figura 3.9(c) mostra a configuração onde os “transponders” OEO são utilizados apenas em interface direta com os OLT's. E a configuração “all-optical”, onde todo o sinal é transmitido no domínio óptico, sem conversões para o domínio elétrico, é mostrada na Figura 3.9(d).

Algumas das mais importantes vantagens dessa última configuração são a alta capacidade de chaveamento, apresentando melhor desempenho que as configurações opacas, e baixo custo, por não utilizar “transponders”. Porém, pelo fato de ser totalmente óptico o OXC não pode desempenhar funções importantes como conversão de comprimentos de onda, regeneração de sinal e “grooming” de velocidades baixas. Estas

funções só podem ser desempenhadas caso o sinal seja convertido para o domínio elétrico. Com o objetivo de prover estas três últimas funções, uma modificação pode ser implementada na estrutura do OXC “all-optical”, acrescentando um “switch” elétrico ao mesmo, como mostra a Figura 3.10. Nesta configuração grande parte dos sinais é comutada no domínio óptico, maximizando a capacidade da rede e minimizando os custos.

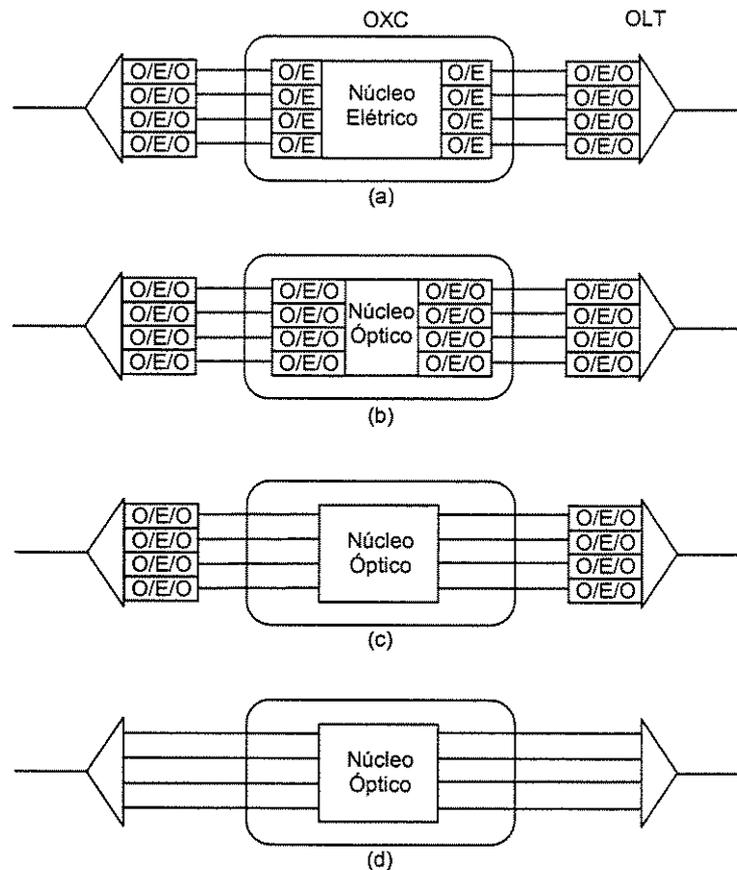


Figura 3.9 – As três primeiras configurações são chamadas do tipo opaca, pois em alguns trechos o sinal óptico é convertido para o domínio elétrico. (a) – Núcleo elétrico. (b) – Núcleo óptico fazendo interface direta com “transponders” OEO. (c) – Núcleo óptico diretamente conectado aos “transponders” OEO dos OLT’s. (d) – Configuração “all-optical”: núcleo óptico conectado diretamente aos OLT’s, sem uso de “transponders”.

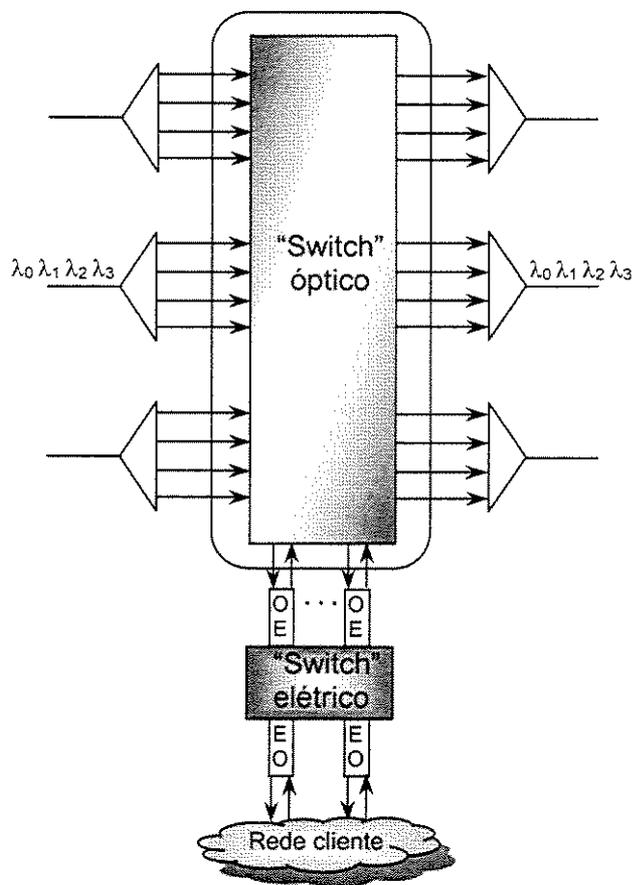


Figura 3.10 – Uma arquitetura real e prática do OXC “all-optical”, utilizando “switch” elétrico para que funções de “grooming” de baixas velocidades, regeneração de sinais e conversão de comprimentos de onda sejam realizadas.

Ao analisar a Figura 3.10, percebe-se que algumas simplificações podem ser feitas. A Figura 3.11 mostra um OXC onde existem “switches” para cada comprimento de onda. Suponha que existem F pares de fibra na rede conectadas ao OXC através dos OLT’s e W comprimentos de onda em cada fibra. Observe que, ao se desejar uma possível realização de “add/drop” em todos os terminais, o OXC da Figura 3.10 terá de conter um “switch” óptico com configuração $(2F \times 2F)$. Para o caso da Figura 3.11, observe que existirão W “switches” do tipo $(2F \times 2F)$. Supondo $F=3$ e $W=18$, calcula-se um “switch” (108×108) para a Figura 3.10 e dezoito “switches” (6×6) para a configuração mostrada na Figura

3.11. “Switches” com grande número de terminais se tornam complexos para construção, e os menores utilizam tecnologia mais simples para seu funcionamento.

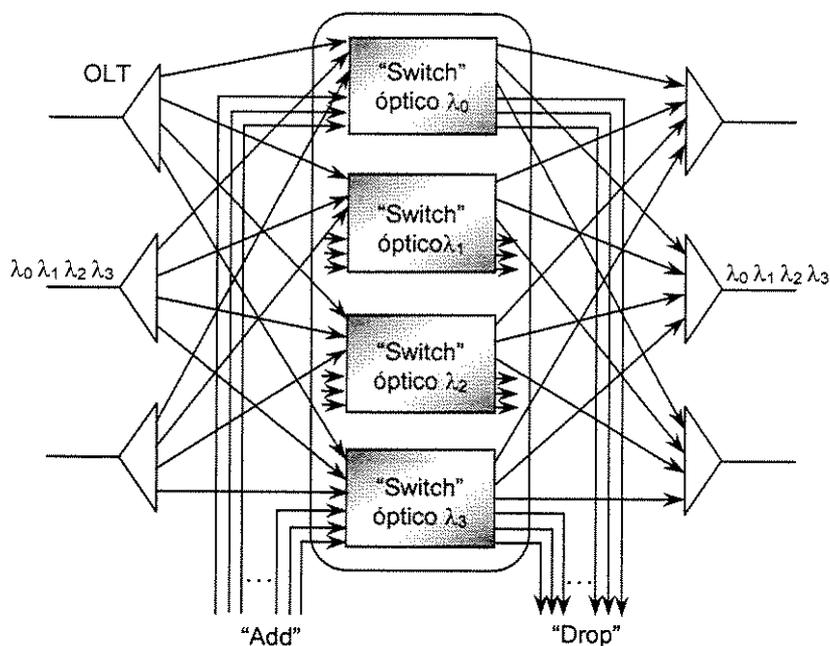


Figura 3.11 – OXC contendo W “switches” ópticos na configuração $2F \times 2F$, onde W = número de comprimentos de onda por fibra e F =número de pares de fibra.

3.2 – Algumas configurações WDM

As redes WDM podem se apresentar em algumas configurações específicas. Uma configuração bem utilizada é a configuração em anel, onde os nós estão dispostos e interligados fisicamente através de um anel. A Figura 3.12 mostra uma rede WDM em anel com oito nós.

Um outro tipo de configuração utilizada pelas redes WDM é a configuração em malha (“mesh”). A Figura 3.13 mostra uma rede WDM utilizando configuração em malha com dezesseis nós.

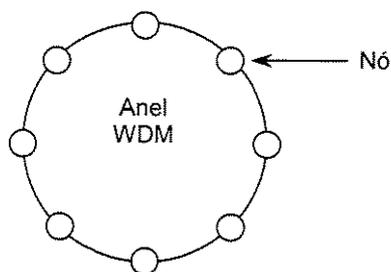


Figura 3.12 – Rede WDM na configuração em anel, com oito nós.

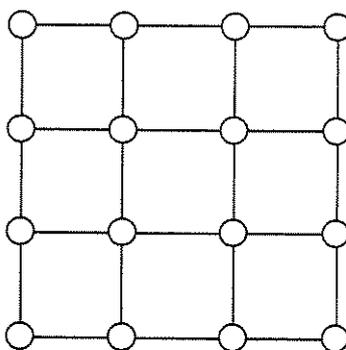


Figura 3.13 – Rede WDM na configuração em malha ("mesh"), com dezesseis nós.

Algumas redes WDM podem ter configurações mistas, contendo parte da rede em malha e outra em anel, como mostra a Figura 3.14.

Suponha que esta rede possua alguns terminais SONET e IP, e que existem apenas dois comprimentos de onda disponíveis. Observa-se que o terminal SONET A utiliza o comprimento de onda λ_1 para realizar conexão com o terminal SONET C localizado num anel óptico. O mesmo comprimento de onda NÃO pode ser utilizado mais de uma vez na mesma fibra.

Nota-se que o mesmo terminal SONET A utiliza o comprimento de onda λ_2 para estabelecer conexão com o terminal SONET D. Observa-se que os terminais SONET C e D

3.3 – Anéis WDM

A evolução das redes com roteamento de comprimentos de onda privilegia, num momento inicial, a topologia física em anel, principalmente por duas razões: 1- a principal cliente da rede fotônica é a rede SDH/SONET, que está organizada em anéis, por razões ligadas à necessidade de proteção contra falhas; 2- o roteamento em anéis pode ser totalmente baseado em OADM's, dispensando o uso de "crossconnects" de maior grau, sendo estes usados em redes com topologias mais emaranhadas, como a topologia em malha ("mesh networks") [13].

Considere uma rede WDM linear composta por três nós: A, B e C. Suponha que cada comprimento de onda é capaz de transportar 10 Gb/s e que conexões de 20 Gb/s precisam ser efetivadas entre os nós A-B, A-C e B-C. Esta hipótese é mostrada na Figura 3.15, onde duas configurações diferentes são apresentadas.

A Figura 3.15(a) mostra uma situação onde todos os comprimentos de onda realizam "add/drop" no nó B, e na Figura 3.15(b) um OADM é usado no nó B, onde dois comprimentos de onda realizam "add/drop" e dois passam direto através do OADM.

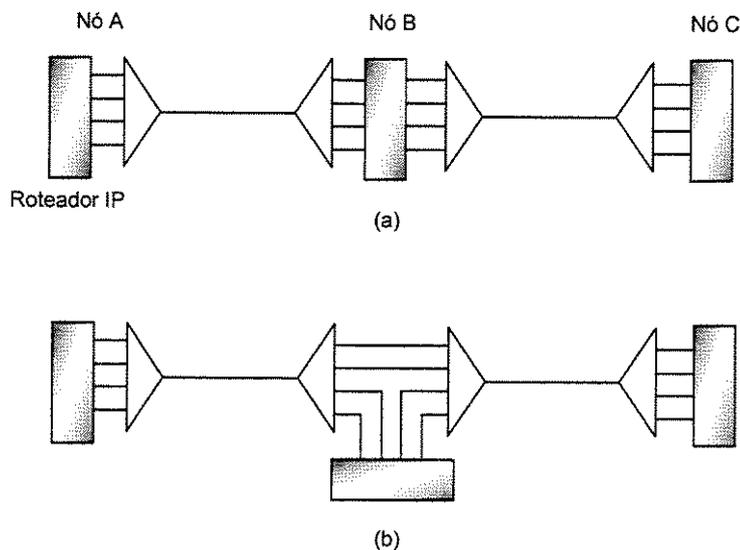


Figura 3.15 – Rede WDM linear com três nós. (a) – Nós A-B e B-C são conectados por "links" WDM, onde todos os comprimentos de onda realizam "add/drop" em B. (b) – Metade dos comprimentos de onda passam através de B.

A topologia vista pelos roteadores IP (camada cliente) é chamada de topologia de caminhos ópticos (“lighthpath topology”) e em alguns casos também conhecida como topologia lógica ou virtual [11]. A topologia formada pelas fibras propriamente em si é chamada de topologia física. As Figuras 3.15(a) e (b), por apresentarem configurações diferentes, também apresentam topologias de caminhos ópticos diferentes, como mostram as Figuras 3.16(a) e (b), respectivamente.

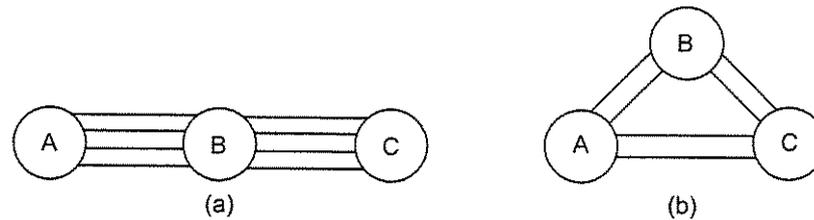


Figura 3.16 – Topologias de caminhos ópticos para as redes presentes nas Figuras (a) – 3.15(a), (b) – 3.15(b).

De posse dessas informações, serão mostradas algumas topologias bem utilizadas em anéis WDM. Considere a topologia física mostrada na Figura 3.17: um anel WDM com quatro nós, o qual serve de suporte para uma rede cliente IP, por exemplo.

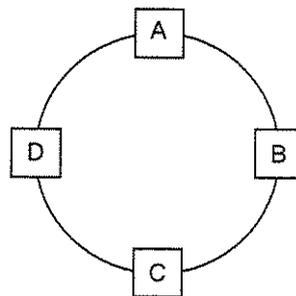


Figura 3.17 – Topologia física de um anel WDM com quatro nós.

A primeira topologia de caminhos ópticos está mostrada na Figura 3.18(a), a qual é chamada de anel WDM ponto-a-ponto (“point-to-point” WDM – PWDM) [11, 13]. Neste caso, todos os comprimentos de onda são convertidos para o domínio elétrico em todos os nós por onde eles passam, mesmo que o nó não seja seu destino. Portanto, a topologia virtual também é um anel, ou múltiplos anéis, se existirem vários comprimentos de onda disponíveis na rede. A Figura 3.19 mostra um exemplo prático de funcionamento desta topologia utilizando dois comprimentos de onda.

A segunda topologia de caminhos ópticos é chamada centralizada com “hub” (“hub design”) e é mostrada na Figura 3.18(b). Todos os roteadores são conectados a um “hub” central por um ou mais caminhos ópticos. Uma simples conexão entre nós necessita de dois caminhos ópticos: um entre o nó origem e o “hub”, e outro entre o “hub” e o nó destino. Um exemplo prático com uma rede que utiliza dois comprimentos de onda é mostrado na Figura 3.20. Percebe-se que um elemento a mais é posto na rede em anel, o “hub”.

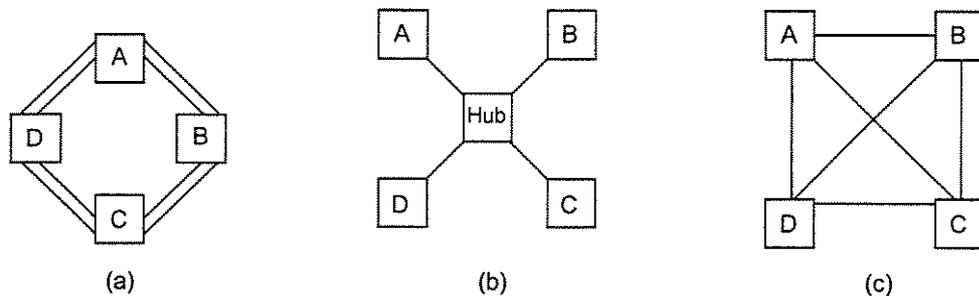


Figura 3.18 – Três topologias diferentes de caminhos ópticos, provenientes de uma topologia física em anel. (a) – WDM ponto-a-ponto (PWDM – “point-to-point” WDM). (b) – Topologia centralizada com “hub”. (c) – Topologia toda óptica (“all-optical”).

A terceira e última topologia de caminhos ópticos, mostrada na Figura 3.18(c), é chamada toda óptica (“all-optical”). Neste caso, todos os nós se comunicam com todos os outros nós diretamente através de caminhos ópticos. A Figura 3.21 mostra um exemplo onde a rede utiliza três comprimentos de onda.

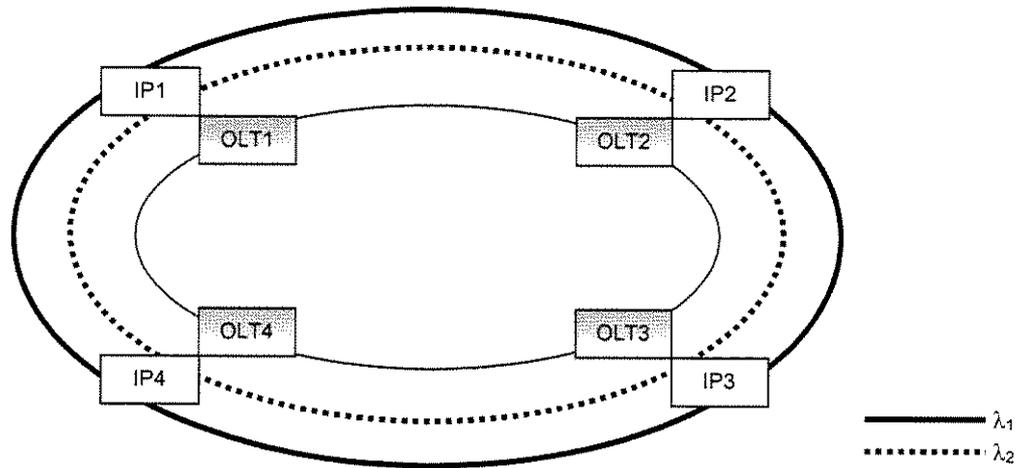


Figura 3.19 – Anel WDM com arquitetura ponto-a-ponto.

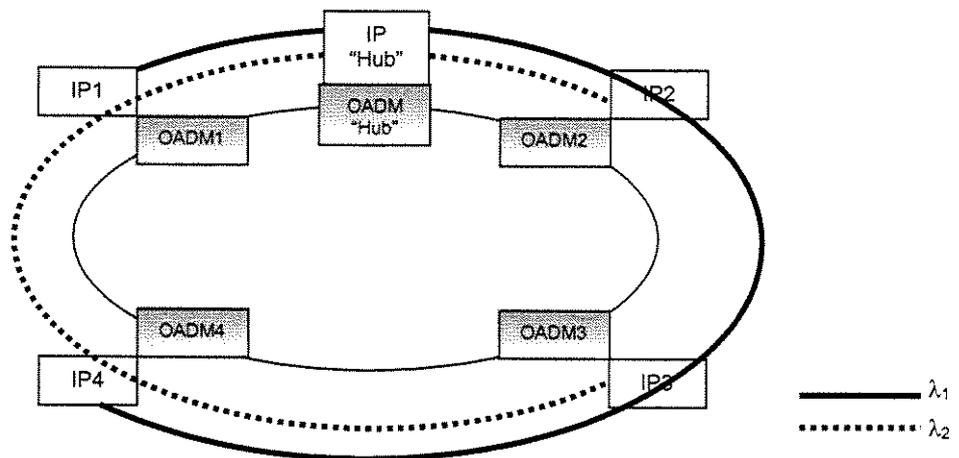


Figura 3.20 – Anel WDM com arquitetura centralizada e uso de "hub".

Para o projeto de redes WDM, em geral, dois aspectos muito importantes são analisados: LTD e RWA [11]. O LTD ("Lighthpath Topoloy Design") está envolvido diretamente com a rede cliente, onde serão determinadas as conexões entre nós específicos da rede, bem como a taxa de transmissão utilizada. De posse disto, a análise do RWA ("Routing Wavelength Assignment") irá fornecer rotas para comprimentos de onda

específicos atenderem às conexões. Portanto, estes dois tópicos são de fundamental importância para o projeto de redes WDM.

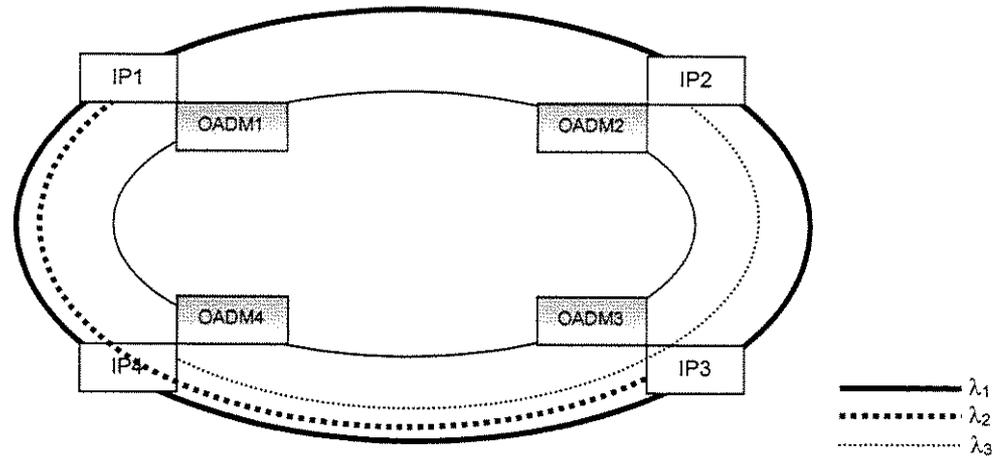


Figura 3.21 – Anel WDM com arquitetura totalmente óptica (“all-optical”).

Os anéis WDM podem ser considerados com bloqueio ou sem bloqueio [13]. No modelo com bloqueio, o desempenho é medido pela probabilidade das requisições serem bloqueadas por impossibilidade de atendimento e no modelo sem bloqueio, o desempenho é medido pelo número de comprimentos de onda necessários para atender sem bloqueio todas as requisições de caminhos ópticos que obedeçam às restrições sobre o tráfego.

Pode-se dizer que o tráfego apresenta duas formas distintas: “offline” ou “online”. No tráfego “offline” uma lista de caminhos ópticos a serem implementados é apresentada à rede de antemão, de modo que a alocação de rota e comprimento de onda pode ser otimizada. Já no tráfego “online”, cada caminho é requisitado individualmente, sem prévio conhecimento dos caminhos a serem utilizados.

O tráfego “online” pode conter caminhos que nunca são desativados, que são chamados caminhos permanentes, e a rede chamada incremental, ou pode conter caminhos

que são desativados, os quais são chamados de caminhos voláteis, e a rede chamada dinâmica.

A partir do próximo capítulo desta dissertação considera-se que os anéis WDM são anéis com bloqueio, com topologia de caminhos ópticos toda óptica (“all-optical”), podendo qualquer nó fazer conexão direta com outro nó através de um caminho óptico, de tráfego “online” com caminhos voláteis.

4 – Anéis WDM com números limitados de transceptores e comprimentos de onda

Neste capítulo serão estudados os desempenhos de anéis WDM com números limitados de comprimentos de onda e de transceptores por nó, sendo seus transmissores totalmente sintonizáveis ou fixos num comprimento de onda específico.

Variando-se o número e sintonizabilidade dos transceptores ópticos, desempenhos específicos podem ser obtidos ao serem analisadas as probabilidades de bloqueio para cada caso. Esses dados possibilitarão um leque de opções a serem selecionadas de acordo com desempenho e custo.

Através do uso de um simulador construído em C++, diversas simulações foram realizadas e observadas neste capítulo, as quais permitiram atingir resultados que serão mostrados no transcorrer da dissertação.

Considere um anel WDM bidirecional com bloqueio, o qual possui duas fibras, com caminhos unidirecionais entre nós em cada fibra, sendo a comunicação no sentido horário em uma fibra e anti-horário na outra, com N nós e W comprimentos de onda, como mostra a Figura 4.1. Este é o cenário da rede utilizada por todo este capítulo. Redes WDM com essas características podem ser aplicadas para suportarem redes IP como rede cliente, por exemplo.

Para efeito de padronização, considere nesta dissertação que um transceptor da rede WDM é representado pelo bloco mostrado na Figura 4.2, ou seja, um conjunto transmissor (TX)/receptor (RX) que faz interface com a rede WDM e outro conjunto TX/RX que faz interface com a rede cliente [11]. Porém, a partir deste instante, considere também que os termos TX e RX serão utilizados para se referirem aos que fazem interface apenas com a rede WDM. Como o anel WDM considerado neste capítulo utiliza duas fibras, considere que X transceptores por nó implicam em X TX's e X RX's por nó para cada sentido do anel (horário e anti-horário).

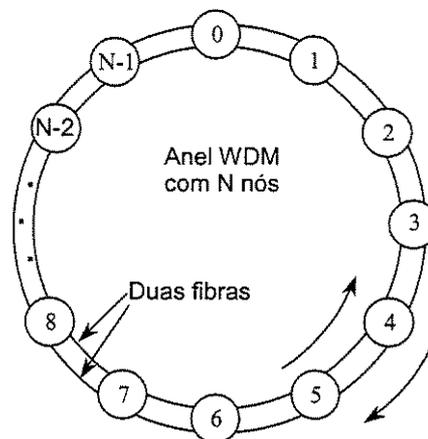


Figura 4.1 - Anel WDM com N nós, W comprimentos de onda, com duas fibras e comunicações unidirecionais em cada fibra.

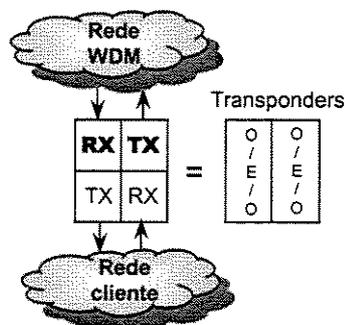


Figura 4.2 - Um par TX/RX que faz interface com a rede cliente e outro que faz interface com a rede WDM. Isto corresponde a um par de transponders simples OEO.

Todos os nós são formados de OADM's ("Optical Add/Drop Multiplexers"), que são responsáveis pelo acréscimo/retirada ("add/drop") de comprimentos de onda na rede.

Foram considerados dois cenários para cada nó: 1- Nó com receptores (RX's) totalmente sintonizáveis e transmissores (TX's) fixos, ou 2- Nó com RX's e TX's totalmente sintonizáveis. Portanto, para ambos os cenários, dado que o RX não esteja ocupado numa requisição, ele pode receber qualquer comprimento de onda proveniente de qualquer TX. No cenário 1, cada TX apenas pode emitir num comprimento de onda fixo e,

no cenário 2, cada TX pode emitir em qualquer comprimento de onda dentre os W utilizados na rede.

Uma sugestão de implementação do nó é mostrada na Figura 4.3, para o caso onde três transceptores sintonizáveis por nó são usados. Nesta figura T representa TX e R, RX. Note que a representação da caixa T em negrito indica que o TX é sintonizável.

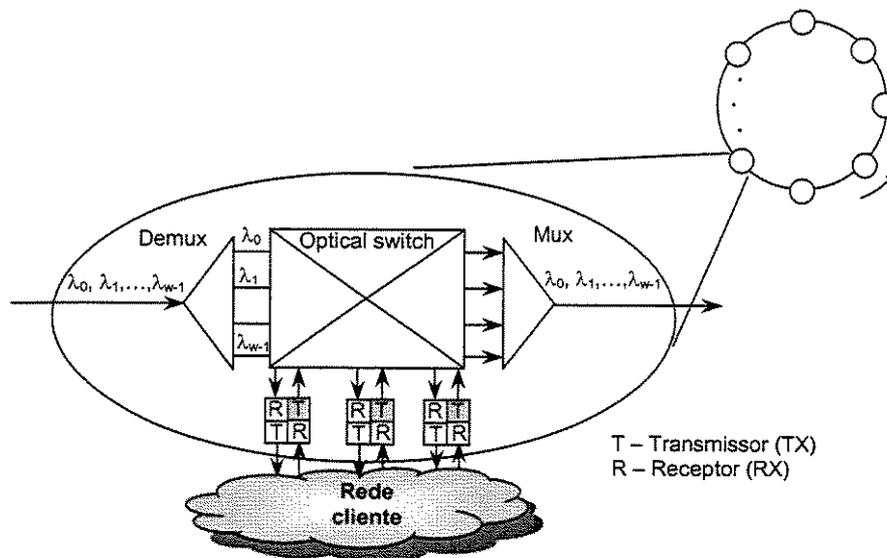


Figura 4.3 - Uma sugestão de implementação do nó para um anel WDM com três TX's sintonizáveis por nó. Esta configuração também é empregada para o sentido oposto na outra fibra.

Observe que a implementação do nó utiliza a configuração paralela do OADM totalmente sintonizável, mostrado na Figura 3.7(d) do capítulo 3, o que garante uma maior escalabilidade à rede. Note também que a configuração apresentada é referente a apenas um sentido do anel, neste caso o anti-horário, utilizando uma fibra. Na outra fibra esta mesma configuração está presente para o outro sentido.

Considere também que todos os nós na rede são idênticos, ou seja, de características semelhantes em relação ao número e sintonizabilidade dos transceptores. Portanto, serão analisados casos em que todos os nós terão o mesmo número de transceptores, sendo todos os transmissores fixos ou todos sintonizáveis. Observe que serão utilizados RX's sintonizáveis em todos os casos, pois a implementação da total sintonizabilidade nos mesmos não acarreta em custos elevados.

O tráfego utilizado na rede é uniforme, com chegadas de requisição poissonianas de taxa λ' e taxa de atendimento μ , gerando uma intensidade de tráfego de (λ'/μ) Erlangs.

O simulador sorteia aleatoriamente os nós origem e destino, o último diferente do primeiro. Existem apenas duas opções de caminho para realização de conexão no anel: o caminho mais curto ou o alternativo. Duas políticas de roteamento foram estudadas:

1- **SPR** (“Shortest Path Routing”), onde apenas os caminhos mais curtos são verificados e, se estes estiverem indisponíveis, o bloqueio da requisição é gerado;

2- **DRS** (“Dynamic Routing/Shortest Path First”), onde primeiramente o caminho mais curto é analisado e, se este estiver indisponível, o caminho alternativo é verificado e, caso este último também esteja indisponível, o bloqueio será gerado [14].

Através do exemplo mostrado na Figura 4.4, estas políticas de alocação de rota podem ser analisadas. Nesta figura, suponha um anel WDM com duas fibras, caminhos unidirecionais em cada fibra, dezesseis nós e quatro comprimentos de onda utilizados na rede. Uma requisição 1→4 chega ao anel no nó 1, com objetivo de efetivar uma conexão do nó 1 com o nó 4. Considere que neste período de tempo o “link” 2→3 se encontra totalmente esgotado, ou seja, todos os quatro comprimentos de onda já estão sendo utilizados por outras conexões. Observe que o caminho mais curto entre os nós 1 e 4 é o caminho 1, representado na Figura 4.4. O caminho mais longo é representado pelo caminho 2. Se a alocação de rota utilizar a política SPR, perceba que apenas o caminho mais curto, neste caso o caminho 1, será analisado. Um caminho é dito disponível quando ao menos um comprimento de onda está disponível em todos os “links” que envolvem a requisição (sendo o mesmo comprimento de onda em todos os “links” caso não haja conversão de comprimentos de onda nos nós), com disponibilidade também de TX na origem, RX no destino e compatibilidade entre TX e comprimento de onda. Neste exemplo o caminho 1 não estará disponível devido ao esgotamento do uso de comprimentos de onda no “link” 2→3. Portanto, para SPR, esta requisição será bloqueada.

Caso a alocação de rota utilize a política DRS, perceba que inicialmente o caminho 1 é analisado, onde se verifica sua indisponibilidade. Dado que este caminho não está disponível, o caminho alternativo, representado pelo caminho 2, será analisado. Caso este

esteja disponível, a requisição se tornará uma conexão estabelecida. Caso contrário, o bloqueio será atingido.

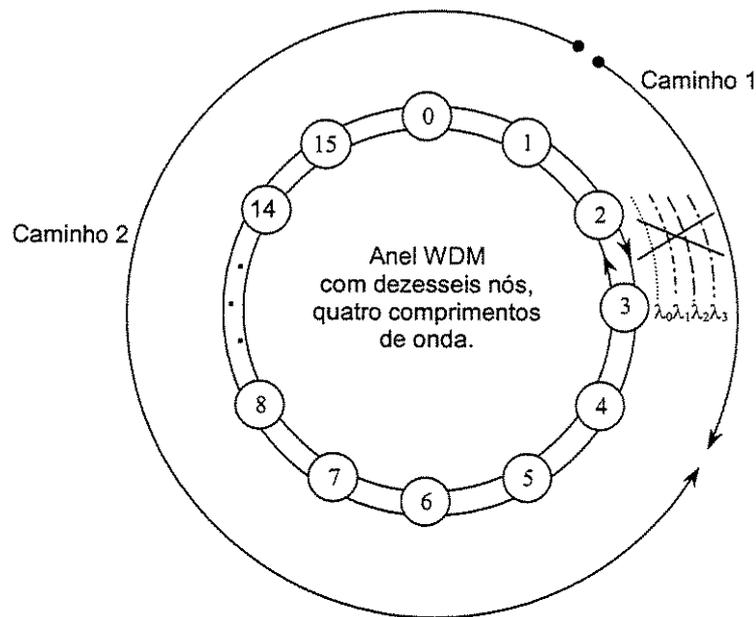


Figura 4.4 - Anel WDM com dezesseis nós, quatro comprimentos de onda, com duas fibras e comunicações unidirecionais em cada fibra. Caminho 1 representa o caminho mais curto para a requisição 1→4, e o caminho 2, o caminho alternativo.

Se os nós sorteados forem antípodas (metade do anel), serão escolhidos caminhos no sentido horário e anti-horário, alternadamente.

Após o sorteio dos nós origem e destino e indicação do caminho mais curto, o comprimento de onda a ser alocado terá de ser indicado. Usa-se um algoritmo do tipo “first fit” (ajuste prioritário) para se realizar essa alocação [14]. Esse tipo de algoritmo estabelece algum critério de prioridade entre os comprimentos de onda disponíveis na rede. O algoritmo utilizado nesta dissertação foi o de prioridade fixa (PF), que é do tipo “first fit”, no qual uma lista de comprimentos de onda é estabelecida e, ao ser solicitada a escolha de um comprimento de onda, o primeiro da lista que não estiver sendo usado nos “links” específicos deverá ser alocado.

Quando se trabalha com rede WDM em anel com transmissores fixos, é necessário saber quais comprimentos de onda serão utilizados por cada nó, mediante o leque de opções de comprimentos de onda disponíveis na rede. Para especificar esses comprimentos de onda, foram utilizadas duas matrizes de entrada (uma para o sentido horário e outra para o sentido anti-horário). Cada matriz (Nós x Comprimentos de onda) conterà elementos 0 e 1. O elemento 1 identificará a presença de transmissor no comprimento de onda referente à sua coluna e o nó específico referente ao número de sua linha na matriz. O elemento 0 indicará ausência de transmissor. Anéis WDM com $N=32$ e $W=16$ apresentarão matriz de entrada com grandeza (32×16) , como mostra a Figura 4.5.

		Comprimentos de onda															
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Nós	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
	6	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	7	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
	9	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	10	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
	13	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
	16	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
	19	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	20	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
	22	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	23	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	24	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	26	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	27	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	28	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
	29	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1

Figura 4.5 - Matriz de entrada (Nós x Comprimentos de onda) para cinco transmissores fixos por nó.

Considerando n o número de transmissores por nó, o preenchimento da matriz se dará de maneira que na linha correspondente ao nó i , $0 \leq i < N$, os elementos 1 estarão nas colunas $(i.n) \bmod W$, $(i.n + 1) \bmod W$, $(i.n + 2) \bmod W$, ..., $[(i + 1).n - 1] \bmod W$. Todos os demais elementos da linha i serão 0. Esta política de preenchimento de elementos

l na matriz referida é utilizada para evitar que nós vizinhos, ou próximos, utilizem um mesmo comprimento de onda, aumentando a probabilidade de bloqueio da rede por estarem próximos entre si. O preenchimento da matriz para o caso de cinco transmissores por nó é mostrado na Figura 4.5.

As matrizes de entrada (Nós x Comprimentos de onda) para anéis WDM com transmissores fixos para o sentido horário e anti-horário serão consideradas iguais e preenchidas como na Figura 4.5. Essas matrizes não existirão se os transmissores utilizados forem sintonizáveis, visto que estes têm a possibilidade de escolher um dos comprimentos de onda disponíveis na rede.

4.1- Tipos de bloqueio

A Figura 4.6 mostra com simplicidade como uma conexão pode ser estabelecida entre dois nós: origem e destino. A requisição que chega no nó origem tem por objetivo estabelecer uma conexão com o nó destino. A existência dos elementos TX, RX e Lambda (comprimento de onda) é essencial para que isso ocorra. A indisponibilidade de apenas um dos elementos TX, Lambda e RX já implica na geração de bloqueio da requisição.

Quando o transmissor utilizado na origem é sintonizável, as disponibilidades de TX, de Lambda e de RX garantem o estabelecimento da conexão, visto que o TX poderá emitir sinal em um dos comprimentos de onda disponíveis no(s) “link(s)” específico(s).

Porém, quando o transmissor utilizado é fixo, as disponibilidades de TX, de Lambda e de RX não representam uma condição suficiente para o estabelecimento da conexão, visto que o transmissor pode apresentar sintonia num comprimento de onda diferente do(s) disponível(eis) no(s) referido(s) “link(s)”, acarretando a geração de bloqueio. Diz-se, neste caso, que o bloqueio foi gerado por InComPatibilidade (ICP) entre TX e Lambda. Portanto, para que a conexão seja estabelecida, os elementos TX, Lambda e RX têm que estar disponíveis e os elementos TX e Lambda têm que ser compatíveis entre si.

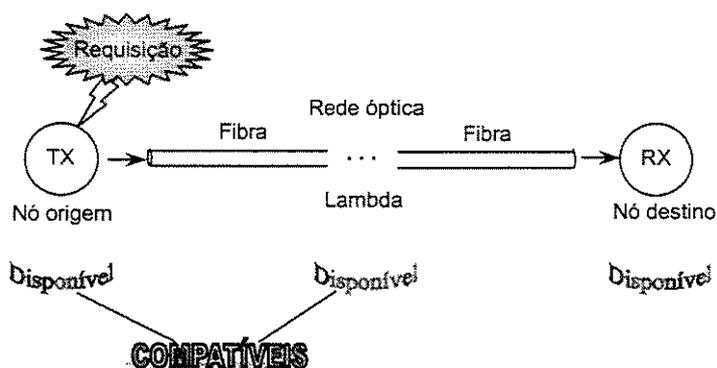


Figura 4.6 - Condição necessária para que uma conexão seja estabelecida entre os nós origem e destino num anel WDM.

Com esta visão de estabelecimento de conexões entre dois nós, as causas geradoras de bloqueio podem ser divididas em nove fatores, os quais podem ser chamados de fatores geradores de bloqueio, tipos de bloqueio ou probabilidades de bloqueio parciais, como mostra a Figura 4.7, visto que a soma deles resultará na probabilidade de bloqueio total da rede.

Elementos:

Probabilidades de bloqueio parciais:

	TX	RX	Lambda
TX	X	OK	OK
RX	OK	X	OK
Lambda	OK	OK	X
TX_RX	X	X	OK
TX_Lambda	X	OK	X
RX_Lambda	OK	X	X
TX_RX_Lambda	X	X	X
ICP	OK	OK	OK
ICP_RX	OK	X	OK

OK - disponível
X - não-disponível

TX's fixos

Figura 4.7 - Probabilidades de bloqueio parciais.

Note que o símbolo OK indica a disponibilidade do elemento ao qual ele se refere e o X indica a sua indisponibilidade.

A probabilidade de bloqueio parcial TX é causada por indisponibilidade apenas de TX, mas com disponibilidades de Lambda e de RX. A probabilidade de bloqueio parcial TX_Lambda é causada por indisponibilidades de TX e de Lambda, mas com RX disponível. E assim sucessivamente. Note que o fator ICP, como visto anteriormente, representa o bloqueio gerado por InComPatibilidade entre TX e Lambda, porém com disponibilidades de TX, de Lambda e de RX. O fator ICP_RX, da mesma maneira, representa o bloqueio gerado por InComPatibilidade entre TX e Lambda, com ambos disponíveis, e indisponibilidade de RX.

Todos os nove fatores estão presentes em redes que utilizam TX's fixos. Porém, os fatores ICP e ICP_RX não estão presentes em redes que utilizam TX's sintonizáveis, as quais apenas apresentam os sete primeiros fatores, visto que os TX's sintonizáveis não apresentam incompatibilidades com os comprimentos de onda.

A Figura 4.8 mostra um diagrama onde os tipos de bloqueio, que representam as probabilidades de bloqueio parciais, podem ser vistos através da representação dos elementos e suas intersecções.

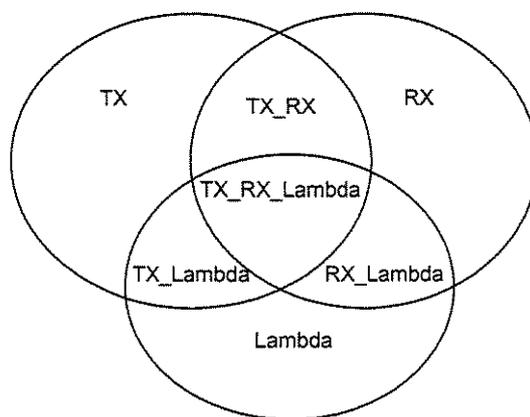


Figura 4.8 - Diagrama com probabilidades de bloqueio parciais (TX's sintonizáveis).

4.2- Simulações

Para um melhor entendimento de funcionamento da rede, dois fluxogramas são mostrados e analisados na Figura 4.9. A Figura 4.9(a) representa o fluxograma da rede quando a política de roteamento escolhida é a SPR (“Shortest Path Routing”). Observa-se a chegada de requisição na rede e, em seguida, os nós origem e destino são identificados. A partir daí, o caminho mais curto é indicado e, se este estiver disponível, ou seja, se os elementos TX, Lambda e RX estiverem disponíveis, e houver compatibilidade entre TX e Lambda quando transmissores fixos são utilizados, a requisição se tornará uma CONEXÃO ESTABELECIDA. Caso contrário, se algum destes fatores não ocorrer, a requisição será BLOQUEADA. O caminho alternativo apenas é verificado quando a política DRS (“Dynamic Routing/Shortest Path First”) é utilizada, como mostra a Figura 4.9(b). Daí, a requisição será bloqueada quando não houver disponibilidades nem do caminho mais curto nem do alternativo.

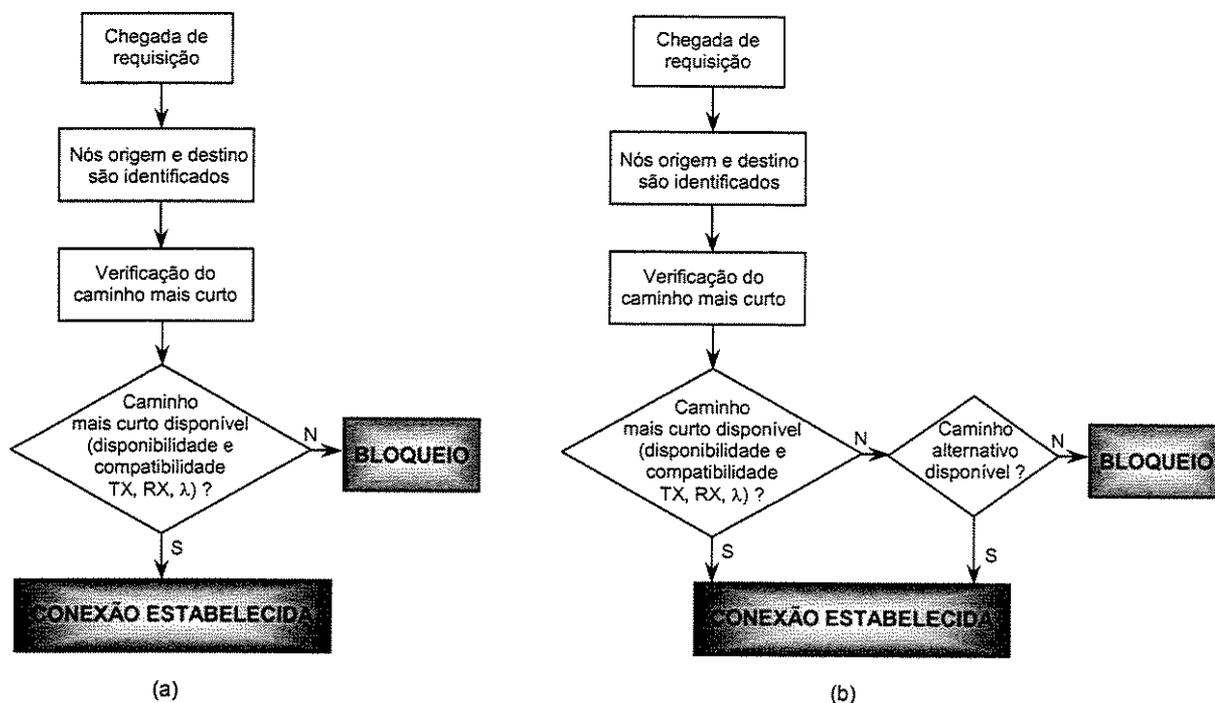


Figura 4.9 - (a) – Fluxograma utilizando a política SPR (“Shortest Path Routing”). (b) – Fluxograma utilizando política DRS (“Dynamic Routing/Shortest Path First”).

Com todas as informações acima citadas, anéis WDM foram simulados considerando um milhão de requisições por simulação. Mil requisições iniciais foram contabilizadas em todas as simulações, visando atingir o estado estacionário da rede, para que a condição de vazio inicial não viesse a influenciar nas análises.

O número de transceptores por nó varia de um a sete, e seus transmissores podem ser fixos ou sintonizáveis.

Para os próximos resultados, considere um anel WDM com $N=32$, $W=16$, com duas fibras, que utiliza a política de roteamento SPR, ou seja, apenas considera o caminho mais curto para realização da conexão.

Um importante aspecto que fornece confiabilidade aos resultados obtidos em simulações é o intervalo de confiança. Para um intervalo de confiança de 95%, o seguinte intervalo é considerado:

$$\left(\bar{X} + \frac{1,96\sigma}{\sqrt{n}}, \bar{X} - \frac{1,96\sigma}{\sqrt{n}} \right),$$

onde \bar{X} representa o valor médio das probabilidades de bloqueio para um determinado valor de tráfego, σ indica o desvio padrão e n é o número de requisições [15]. Este intervalo de 95% é considerado para todas as curvas de probabilidade de bloqueio, provenientes de simulações, plotadas em gráficos em toda esta dissertação.

A Figura 4.10 se refere às simulações realizadas com transmissores fixos, na qual pode-se analisar a probabilidade de bloqueio com o aumento do tráfego em Erlangs/nó, para diferentes números de transmissores. Percebe-se que o melhor desempenho é mostrado pela curva $TX=7$, ou seja, anel com sete transmissores fixos por nó. Quanto maior o número de transmissores por nó, menor será a probabilidade de bloqueio, mesmo que para valores mais elevados de Erlangs/nó.

As mesmas conclusões também servem para a Figura 4.11, onde estão plotadas as curvas para os transmissores sintonizáveis. As curvas para $TX=1$ em ambos os gráficos são praticamente iguais, visto que o bloqueio se dá apenas pelos fatores TX , RX e TX_RX conforme será visto mais adiante, quando as probabilidades de bloqueio parciais forem analisadas.

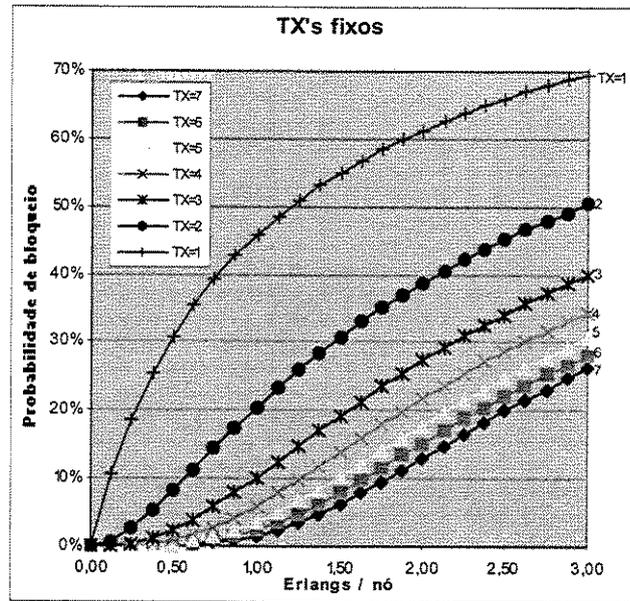


Figura 4.10 – Desempenho de um anel WDM com $N=32$, $W=16$, com variação de um a sete transmissores fixos por nó (TX=1 a 7).

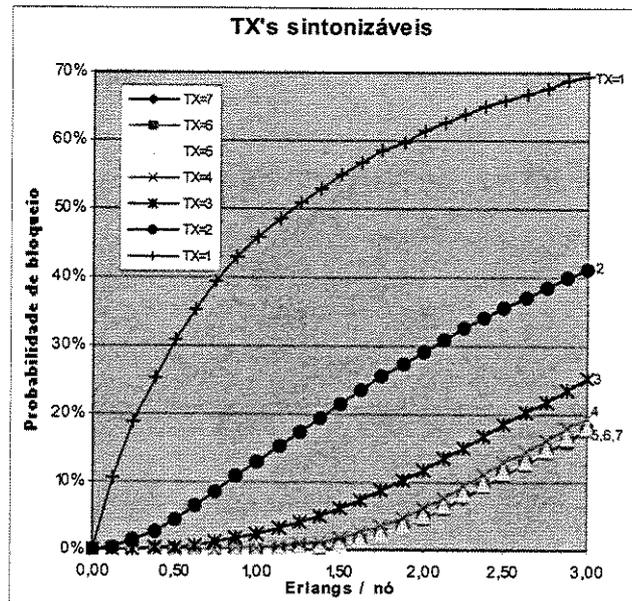


Figura 4.11 - Desempenho de um anel WDM com $N=32$, $W=16$, com variação de um a sete transmissores sintonizáveis por nó (TX=1 a 7).

Percebe-se, no gráfico onde TX's são sintonizáveis, que há uma queda abrupta de valores na probabilidade de bloqueio entre as curvas TX=1 e TX=2. No ponto onde o tráfego assume o valor de 2 Erlangs/nó, vê-se uma redução de aproximadamente 53% na probabilidade de bloqueio de uma curva para outra, sendo este valor em torno de 60% entre as curvas TX=2 e TX=3. Ao observar as curvas TX=3 e TX=4, nota-se que essa queda é de menos de 50%. Entre TX=4 e TX=5, a queda será em torno de 20%, entre TX=5 e TX=6 em torno de 4%, e entre TX=6 e TX=7, 1%. Observa-se, neste caso, que o valor da probabilidade de bloqueio tende a uma saturação, não havendo vantagem notória a partir de determinado ponto o acréscimo de mais transmissores sintonizáveis.

Ao serem analisadas todas as curvas dos transmissores fixos e sintonizáveis mostradas nas Figuras 4.10 e 4.11, serão constatadas vantagens de algumas curvas em relação a outras. Pelos gráficos pode-se concluir que é mais vantajoso utilizar, em uma rede WDM em anel com trinta e dois nós e dezesseis comprimentos de onda, três transmissores fixos por nó em lugar de dois sintonizáveis, pois a curva de probabilidade de bloqueio daqueles é inferior a destes.

Suponha que o custo de um transmissor sintonizável corresponda ao custo de dois transmissores fixos. Redes com quatro TX's fixos por nó e redes com dois TX's sintonizáveis por nó apresentarão custos semelhantes. Porém, pode-se concluir, através de análise dos gráficos, que a utilização de quatro transmissores fixos por nó faz com que a rede apresente um melhor desempenho em relação à utilização de apenas dois transmissores sintonizáveis por nó. Em contrapartida, o desempenho da rede com três transmissores sintonizáveis por nó é melhor que o da rede com seis transmissores fixos por nó. Portanto, várias decisões podem ser tomadas a partir da análise destes gráficos.

A diferença de desempenho entre as curvas TX=5, 6 e 7 na Figura 4.11 é muito pequena. Supondo que os custos estejam concentrados nos transceptores, seria mais interessante calcular as probabilidades de bloqueio em função do número de Erlangs por transceptor e não por nó. Isto é feito na Figura 4.12, concluindo-se que a curva TX=5 apresenta melhor desempenho dentre as três. Porém, neste mesmo gráfico, percebe-se que o melhor desempenho é realizado pela curva TX=3, para $P_b \geq 0,1$. Isto significa que o nó pode ser superdimensionado em termos dos custos suportados para um dado desempenho.

Através dos gráficos da Figura 4.13, pode-se observar a influência dos fatores

causadores de bloqueio analisados no item 4.1, sendo possível identificar quais deles têm maior contribuição na probabilidade de bloqueio total. Estes gráficos representam as probabilidades de bloqueio parciais e a soma deles acarretará na probabilidade de bloqueio total.

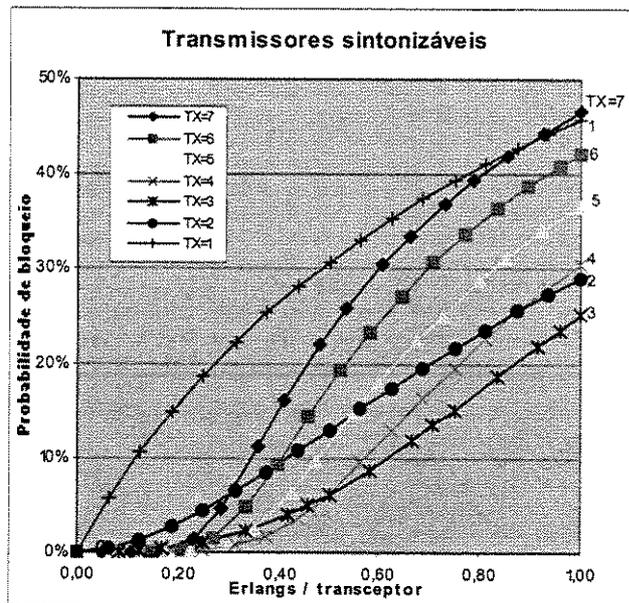
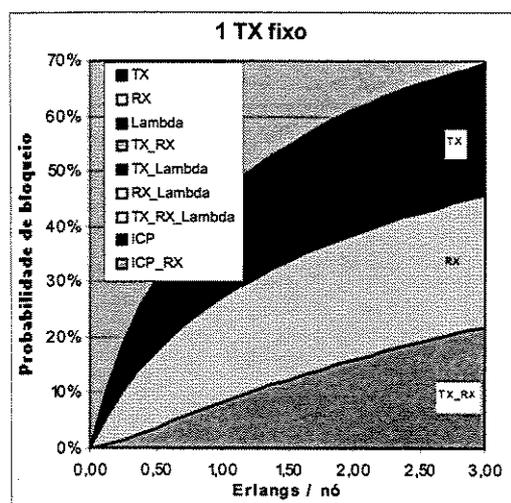


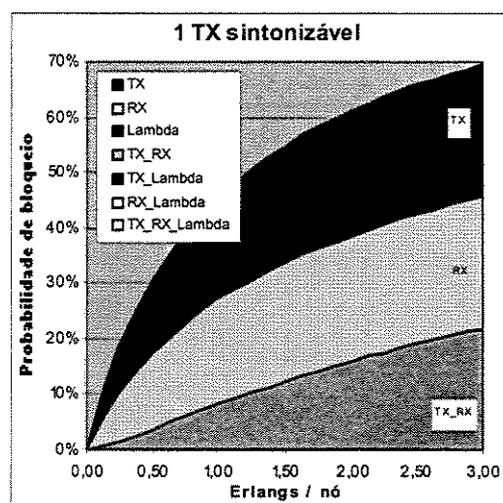
Figura 4.12 – Desempenho de um anel WDM com $N=32$, $W=16$, utilizando TX's sintonizáveis, sob o ponto de vista de Erlangs/transceptor.

Analisando primeiramente as redes com transmissores fixos, percebe-se que para $TX=1$ apenas os fatores TX , RX e TX_RX estarão presentes, de acordo com a Figura 4.13(a), não havendo praticamente nenhuma influência dos outros fatores. Isto implica dizer que não há bloqueio gerado por falta de comprimento de onda neste caso. Ao se aumentar o número de transmissores fixos para $TX=2$, nota-se o aparecimento de outros fatores, dentre os quais, o fator ICP , que representa o fator de maior influência na probabilidade de bloqueio total, como mostra a Figura 4.13(c). Isto pode ser comprovado através da Figura 4.14, onde os fatores geradores de bloqueio são representados como valores percentuais da probabilidade de bloqueio total para dois TX's fixos por nó. As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 mostram esses valores percentuais para quatro TX's fixos, dois TX's sintonizáveis e quatro TX's sintonizáveis por nó, respectivamente. Para três TX's fixos por nó, Figura 4.13(e), percebe-se o aumento da influência do fator ICP e diminuição

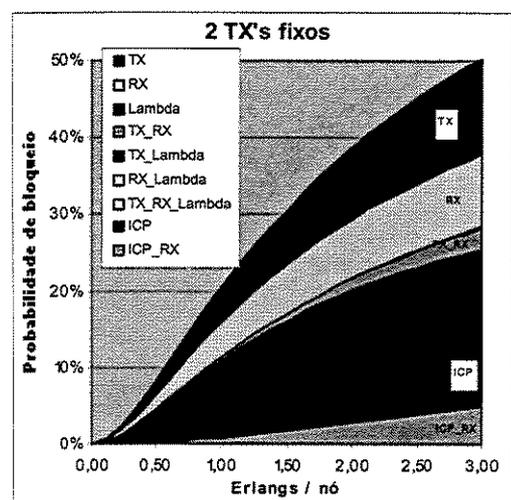
da influência dos fatores TX, RX, e TX_RX. Para quatro TX's fixos por nó, Figura 4.13(g), o fator ICP é predominante, porém percebe-se o surgimento do fator Lambda. Isto pode ser comprovado através da Figura 4.15. Ao se aumentar o número de TX's fixos por nó, percebe-se que o fator ICP tem grande influência, porém o fator Lambda vai se tornando cada vez maior. Realmente a tendência é que o fator Lambda seja o predominante quando o número de transceptores por nó tende a infinito, ou a um valor alto. Pode-se perceber que a presença de transmissores sintonizáveis anula a existência dos fatores de bloqueio ICP e ICP_RX, reduzindo consideravelmente a probabilidade de bloqueio.



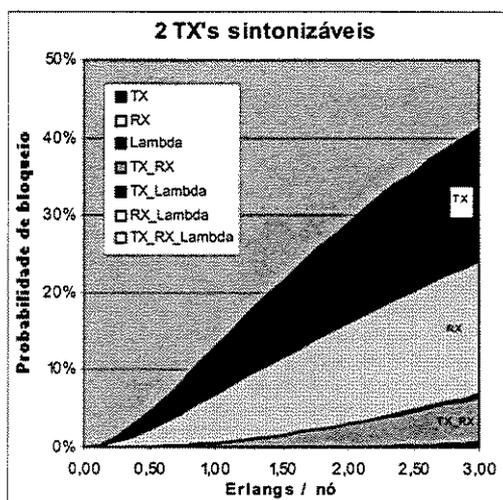
(a)



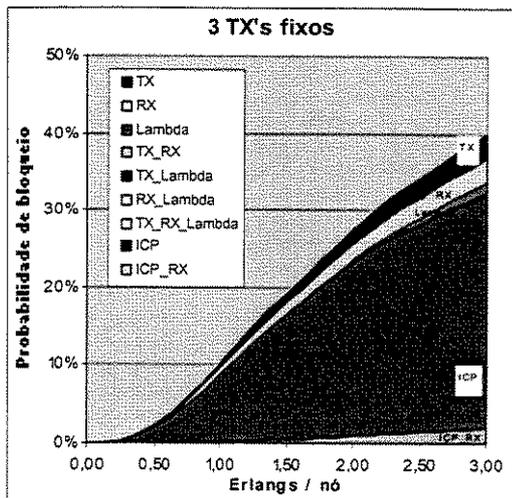
(b)



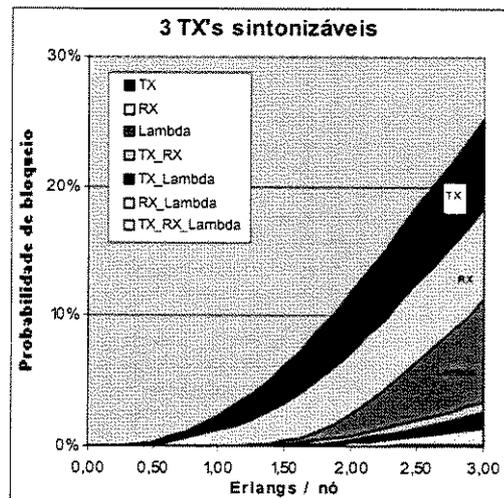
(c)



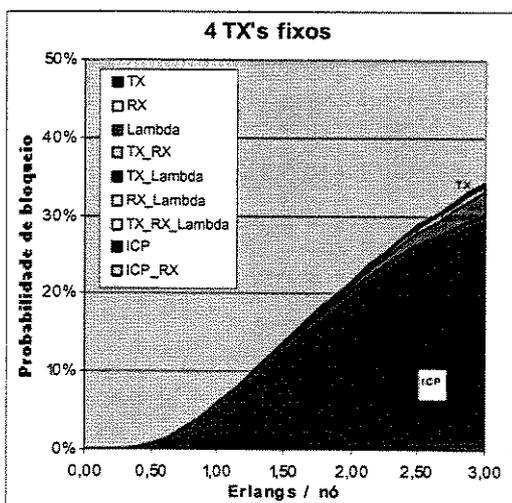
(d)



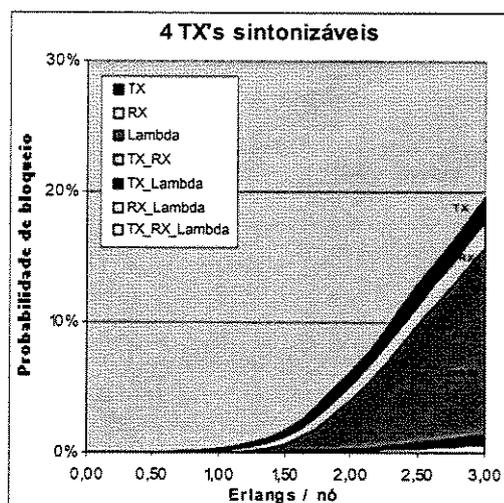
(e)



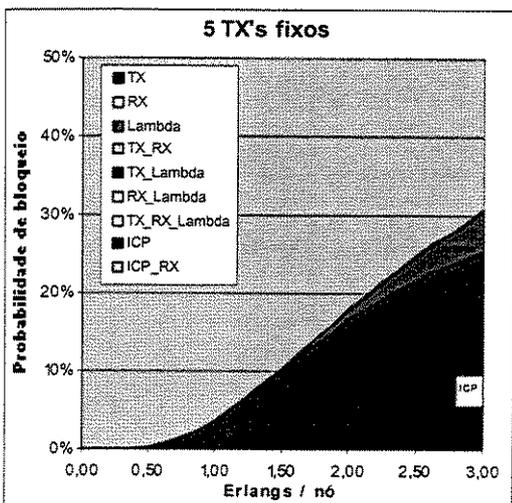
(f)



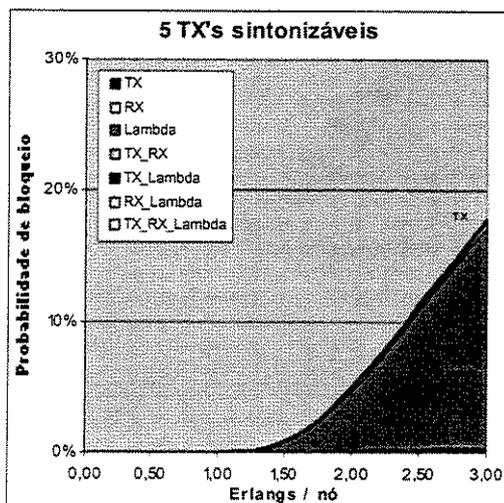
(g)



(h)



(i)



(j)

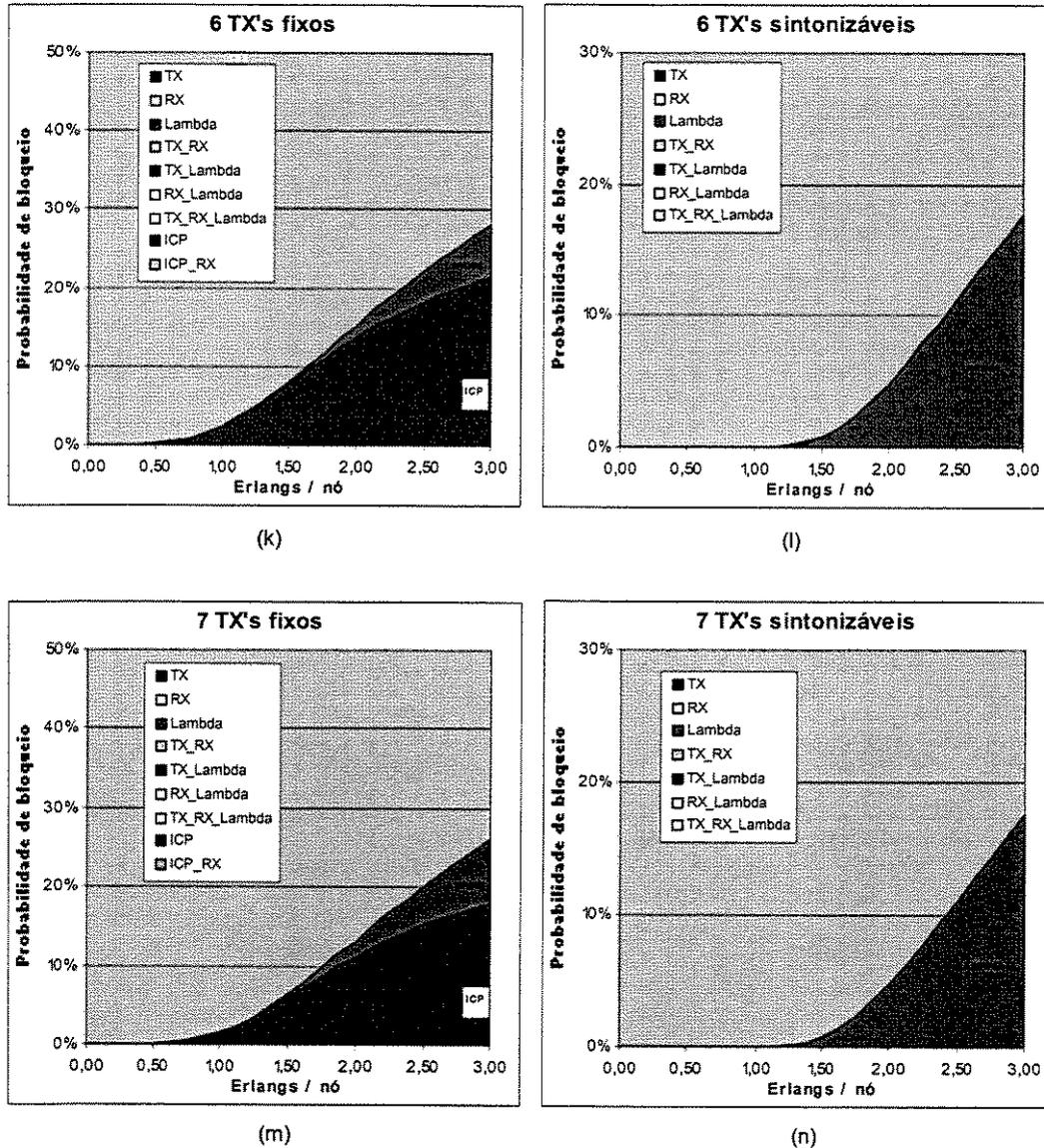


Figura 4.13 – Probabilidades de bloqueio parciais em anéis WDM com variação do número de transceptores por nó de um a sete, bem como variação da sintonizabilidade dos mesmos: fixos ou sintonizáveis.

Ao se analisarem as redes com transmissores sintonizáveis, percebe-se que o gráfico para TX=1, Figura 4.13(b), será semelhante ao da Figura 4.13(a), visto que o número de comprimentos de onda é bem maior que o número de transceptores, tornando pouco provável que o bloqueio seja gerado por falta de comprimentos de onda. Para TX=2 o bloqueio continua sendo bastante influenciado pelos fatores TX, RX e TX_RX, como mostram as Figuras 4.13(d) e 4.16. Ao se aumentar o número de TX's por nó, percebe-se o aparecimento do fator Lambda que passa a ser dominante, como mostram as Figuras

4.13(h) e 4.17, para $TX=4$. E a tendência realmente é que este fator seja dominante para maiores valores de TX , como mostram as Figuras 4.13(j), (l) e (n).

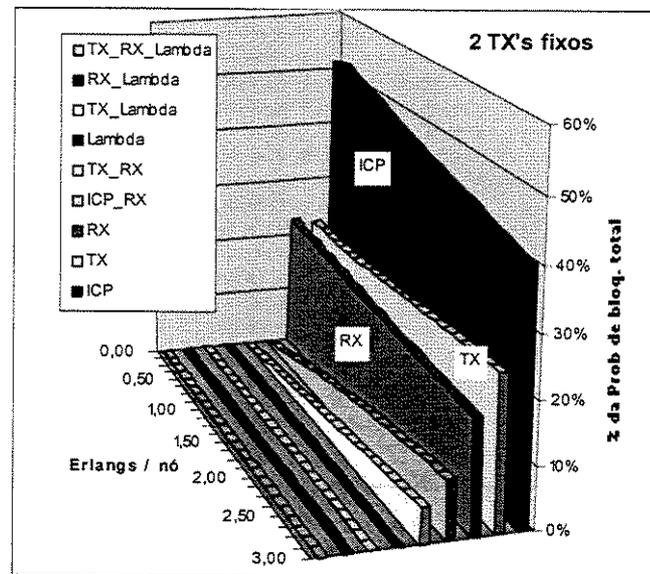


Figura 4.14 – Probabilidades de bloqueio parciais em valores percentuais da probabilidade de bloqueio total para um anel WDM com dois TX's fixos por nó. Fatores TX, RX e ICP são os mais fortes.

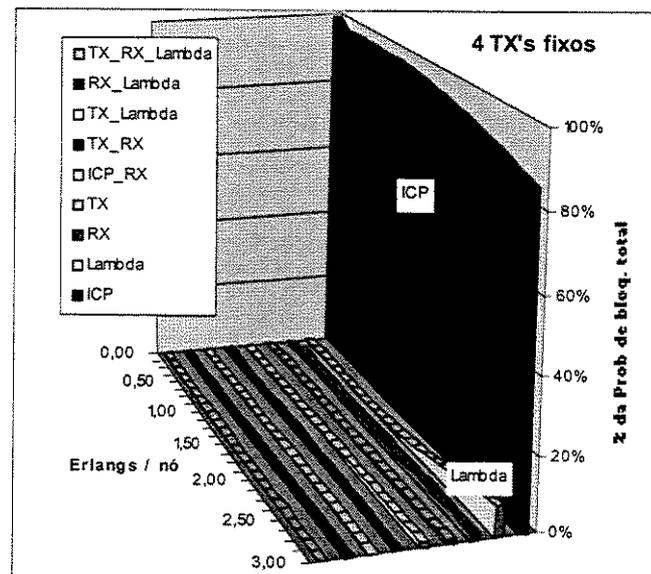


Figura 4.15 – Probabilidades de bloqueio parciais em valores percentuais da probabilidade de bloqueio total para um anel WDM com quatro TX's fixos por nó. Fator ICP é o dominante.

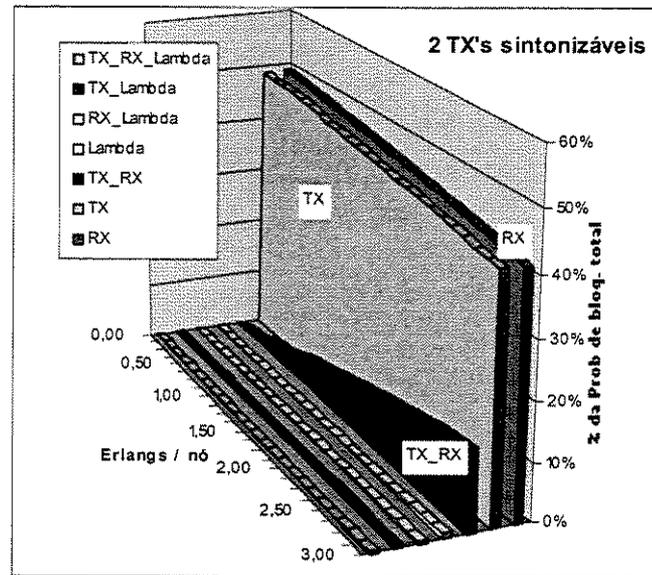


Figura 4.16 – Probabilidades de bloqueio parciais em valores percentuais da probabilidade de bloqueio total para um anel WDM com dois TX's sintonizáveis por nó. Fatores TX, RX e TX_RX são os mais fortes.

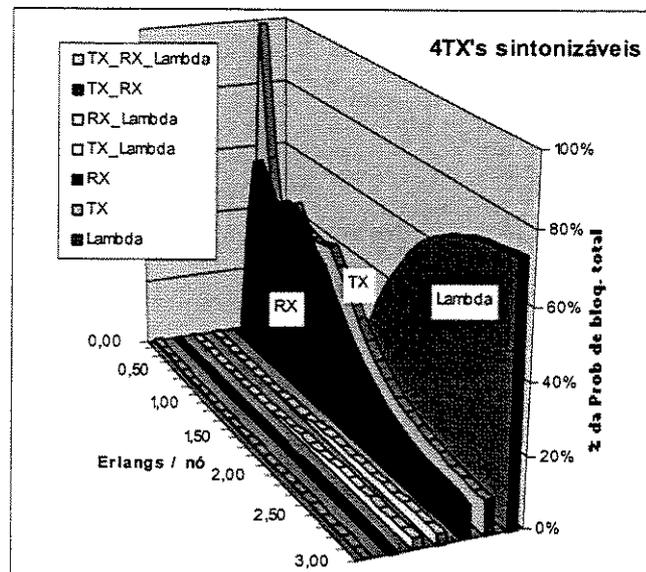


Figura 4.17 – Probabilidades de bloqueio parciais em valores percentuais da probabilidade de bloqueio total para um anel WDM com quatro TX's sintonizáveis por nó. Os fatores mais fortes são TX e RX para tráfego baixo e Lambda para valores de tráfego mais altos.

De fato, os fatores ICP e ICP_RX desaparecem quando os TX's sintonizáveis são utilizados na rede. Isto pode dar a entender que todas as requisições bloqueadas referentes ao ICP se tornem conexões estabelecidas ao serem trocados os TX's fixos por sintonizáveis, bem como todas as requisições bloqueadas referentes ao fator ICP_RX irão contribuir apenas no fator RX. Porém isto NÃO é verdade. Observe o exemplo seguinte.

Considere um anel WDM com uma fibra, conexões unidirecionais no sentido horário, com N nós e W comprimentos de onda. Inicialmente todos os TX's utilizados são fixos. Suponha que no intervalo de tempo de 0s a 30s os nós 1 e 2 possuem disponíveis apenas um TX fixo em λ_3 , cada um, e que os nós 4 e 5 possuem um RX disponível, cada. A Figura 4.18 ilustra a situação debatida.

Suponha também que duas requisições chegarão ao anel neste intervalo de tempo. A primeira requisição chegará ao nó 2, com destino ao 4, no tempo $t_1=5s$ e terá duração de 10s. A segunda requisição chegará ao nó 1, com destino ao 5, no tempo $t_2=10s$ com duração de 15s. Suponha que no "link" 2-3 há disponibilidade apenas de λ_5 , como mostra a Figura 4.18(a). Portanto, diante da configuração apresentada, ambas as requisições serão bloqueadas e contribuirão para o fator ICP, como é visto na Figura 4.18(b).

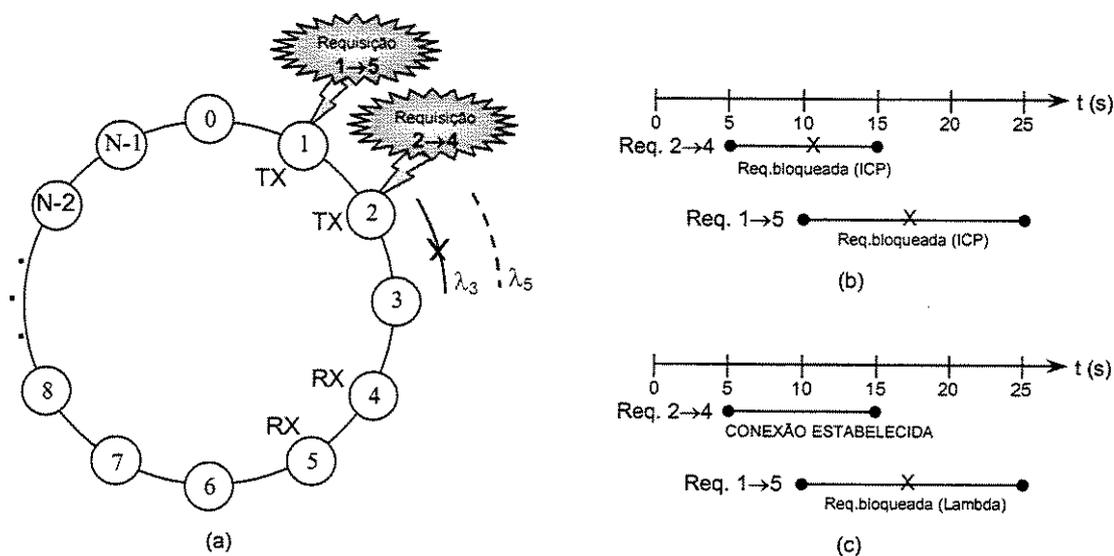


Figura 4.18 - (a) – Anel WDM com um TX disponível nos nós 1 e 2, e um RX disponível nos nós 4 e 5. Requisição 2→4 chega no tempo $t_1=5s$, com duração de 10s, e requisição 1→5 chega no tempo $t_2=10s$ com duração de 15s. (b) – TX's fixos são usados e requisições são bloqueadas. (c) – TX's sintonizáveis são usados e requisição 2→4 se torna uma conexão estabelecida.

Considere agora que os TX's fixos sejam substituídos por sintonizáveis, situação ilustrada na Figura 4.18(c). Como a primeira requisição a chegar é a 2→4, esta se tornará uma conexão estabelecida, pois o TX do nó 2 irá utilizar o comprimento de onda disponível λ_5 para realizar a conexão. No tempo $t_2= 10s$, a requisição ao chegar no nó 1 encontrará o "link" 2-3 totalmente indisponibilizado sob o ponto de vista de comprimentos de onda. Portanto, a requisição 1→5 será bloqueada por falta de comprimento de onda, contribuindo para o fator Lambda.

Uma análise semelhante pode ser realizada com relação às requisições bloqueadas que contribuem com o fator ICP_RX. Ao se usar TX's sintonizáveis estas requisições bloqueadas poderão contribuir com o fator RX ou RX_Lambda.

Portanto, percebe-se que ao trocar TX's fixos por sintonizáveis, nem todas as requisições bloqueadas referentes ao fator ICP se tornarão conexões estabelecidas e nem todas referentes ao ICP_RX se tornarão requisições bloqueadas devido a falta de RX. A Figura 4.19 ilustra um resumo deste assunto debatido.

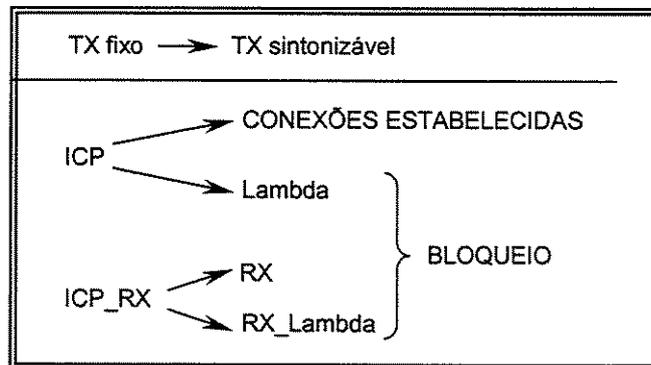


Figura 4.19 - Ao serem trocados os TX' fixos por sintonizáveis, as requisições bloqueadas referentes ao fator ICP podem se tornar conexões estabelecidas ou requisições bloqueadas por falta de comprimento de onda (Lambda). E requisições bloqueadas referentes ao fator ICP_RX podem se tornar requisições bloqueadas por falta de receptor (RX) ou faltas de receptor e de comprimento de onda (RX_Lambda).

As análises feitas neste capítulo têm levado em conta apenas a política de roteamento SPR. A partir daqui, serão estudadas as duas políticas, SPR e DSR, e através dos gráficos as vantagens e desvantagens de cada uma delas poderão ser vistas.

A Figura 4.20 mostra o desempenho de um anel WDM com $N=32$, $W=16$, com duas

fibras, com variação do número de transceptores por nó e utilização das políticas de roteamento SPR (que seleciona apenas o menor caminho) e DSR (que seleciona o menor caminho e, estando este indisponível, o caminho alternativo é escolhido). Pode-se verificar através dos gráficos que todas as curvas das redes que utilizam a política DRS apresentam melhor desempenho até um determinado valor de tráfego e, a partir deste ponto, o melhor desempenho é apresentado pelas redes que utilizam a política SPR. Ou seja, para tráfego mais baixo, o melhor desempenho é realizado pelas redes que utilizam a política DRS e para valores de tráfego mais altos, o melhor desempenho é mostrado pela política SPR. Para as curvas de TX=1, este valor limite é em torno de 4 Erlangs / nó e para as demais curvas, este valor gira em torno de 2,5 para 3 Erlangs / nó.

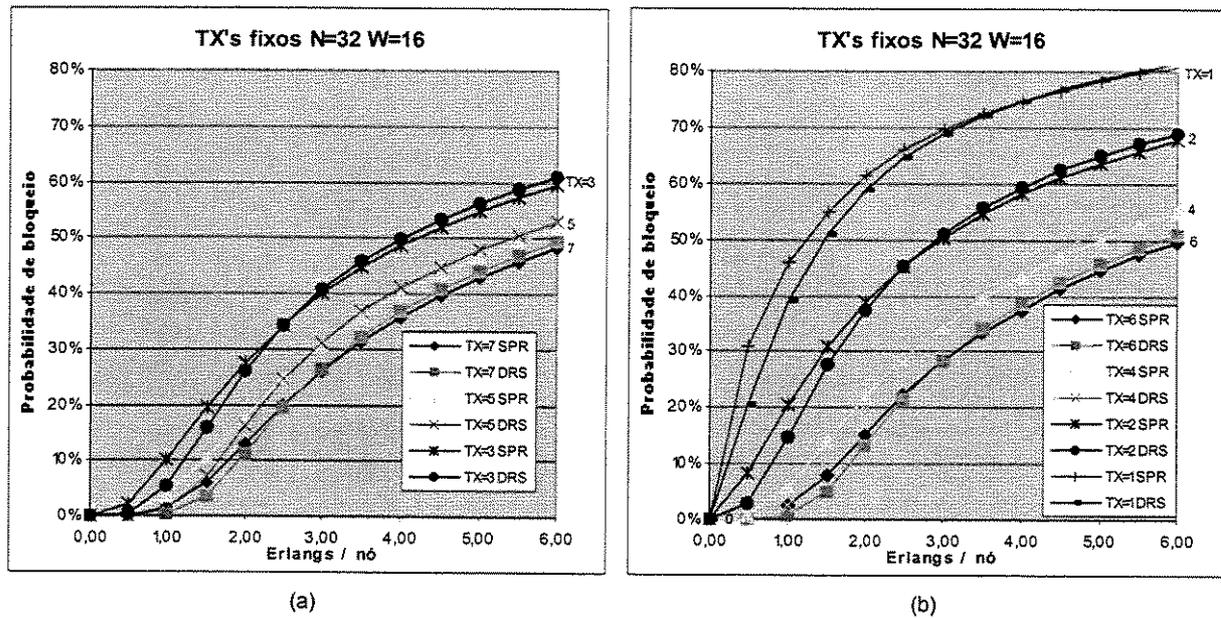


Figura 4.20 – Desempenho de anéis WDM com trinta e dois nós e dezesseis comprimentos de onda, com variação do número de transceptores por nó, utilizando políticas de roteamento SPR ("Shortest Path Routing") e DRS ("Dynamic Routing/Shortest Path First"). (a) Curvas para TX=7, 5 e 3. (b) Curvas para TX=6, 4, 2 e 1.

As mesmas conclusões podem ser tiradas quando uma rede com $N=32$, $W=8$, com duas fibras, é analisada, como mostra a Figura 4.21. Para as curvas referentes à TX=1 o valor limite é de 1,5 Erlangs / nó, aproximadamente, e de 1,25 Erlangs / nó para as demais

curvas. Portanto, os valores de limite variam de acordo com a configuração que é utilizada pela rede, dependendo também do tráfego o qual está sendo analisado.

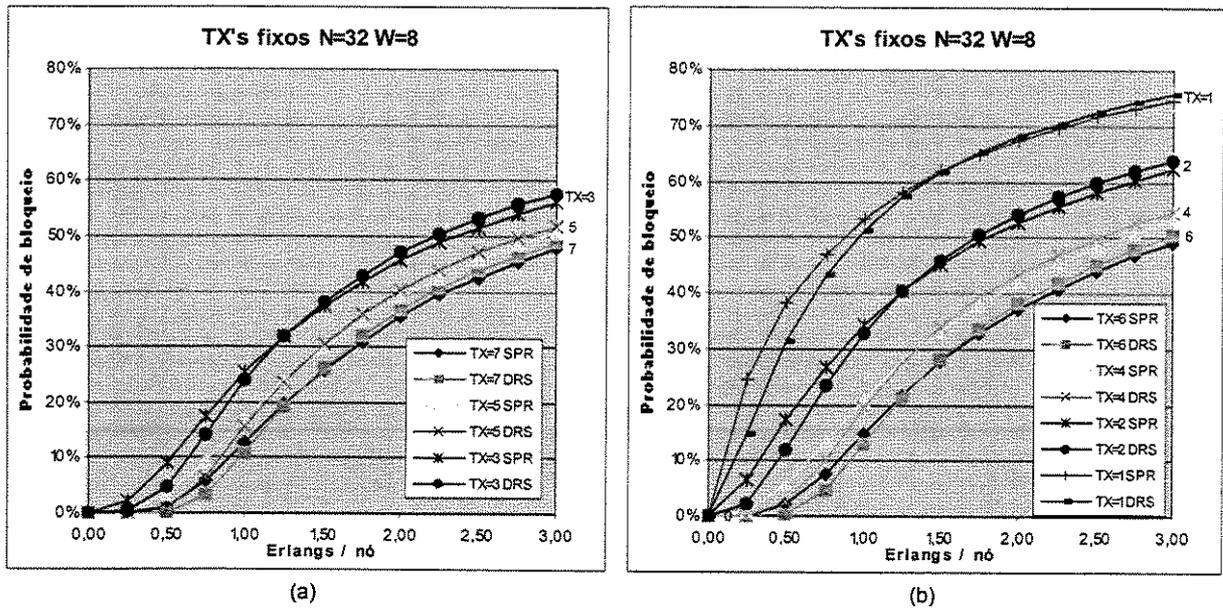


Figura 4.21 – Desempenho de anéis WDM com trinta e dois nós e oito comprimentos de onda, com variação do número de transceptores por nó, utilizando políticas de roteamento SPR ("Shortest Path Routing") e DRS ("Dynamic Routing/Shortest Path First"). (a) Curvas para TX=7, 5 e 3. (b) Curvas para TX=6, 4, 2 e 1.

5- Redes WDM limitadas apenas pelos recursos nodais

Neste capítulo serão estudadas redes WDM que são limitadas apenas por recursos nodais, ou seja, com limitação de disponibilidades de elementos TX e RX no nó. Portanto, o número de comprimentos de onda existente na rede será considerado suficientemente grande de modo que o bloqueio nunca será causado por indisponibilidade de comprimento de onda. Esta condição pode ser entendida como largura de banda infinita, sendo esta uma situação não-real, visto que as redes reais apresentarão bloqueios também por indisponibilidade de comprimentos de onda. Trata-se, porém, de uma situação-limite que representa o desempenho de uma rede com amplos recursos de banda na fibra, mas limitadas pelos recursos nodais. Qualquer rede prática com a mesma quantidade de recursos nodais terá desempenho inferior a esta situação-limite.

O objetivo deste capítulo é mostrar os valores limitantes inferiores de probabilidade de bloqueio para determinadas redes WDM, ou seja, o melhor desempenho que a rede pode assumir quando se trabalha com largura de banda infinita.

Considere uma rede WDM com tráfego uniforme, com chegadas poissonianas de taxa λ , e atendimento com duração exponencialmente distribuída de duração média μ^{-1} . Os estudos serão realizados através da análise de diagramas de estado derivados de sistemas markovianos [16], que serão apresentados através de alguns exemplos que se seguem.

Exemplo 1- Considere uma rede WDM com dois nós, um transceptor por nó, uma fibra e conexões unidirecionais, como mostra a Figura 5.1. Se A e B são os dois nós, percebe-se a existência de quatro configurações:

- 0 : não há conexões ativas;
- 1a : apenas a conexão AB está ativa;
- 1b : apenas a conexão BA está ativa;

2 : as conexões AB e BA estão ativas.

Os estados referentes a estas configurações podem ser vistos na Figura 5.2(a), juntamente com as taxas de transição de estados. Note que os estados 1a e 1b são equivalentes, pois têm a mesma probabilidade de bloqueio e suas taxas de chegada e saída para outros estados são equivalentes. Desta maneira, estes estados podem ser aglutinados em apenas um, resultando num diagrama finito de estados como mostra a Figura 5.2(b).

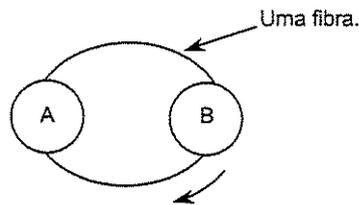


Figura 5.1 – Rede WDM com dois nós, uma fibra e um transceptor por nó.

O objetivo, a partir daqui, é encontrar o valor da probabilidade de bloqueio total para a rede e para isto, um estudo analítico será realizado.

Considere σ_{ij} a taxa de transição do estado i para o estado j , como mostra o diagrama da Figura 5.2. A probabilidade de transição do estado i para o estado j é dada por:

$$p_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sum_k \sigma_{ik}} \quad (1)$$

As probabilidades de transição obtidas de (1) definem a matriz de probabilidades de transição de estados $A = \{ p_{ij} \}$. A probabilidade seqüencial p_i é definida como a probabilidade de se estar no estado i , levando em conta todos os estados existentes, porém não considerando o tempo de permanência em cada estado. O vetor probabilidade seqüencial de estado $\mathbf{p} = (p_0, p_1, p_2)$ pode ser obtido das equações que se seguem:

$$\mathbf{p} = \mathbf{p} \cdot \mathbf{A} \quad (2)$$

$$\mathbf{p} \cdot \mathbf{1} = 1 \quad (3)$$

onde $\mathbf{1}$ é o vetor coluna de elementos 1.

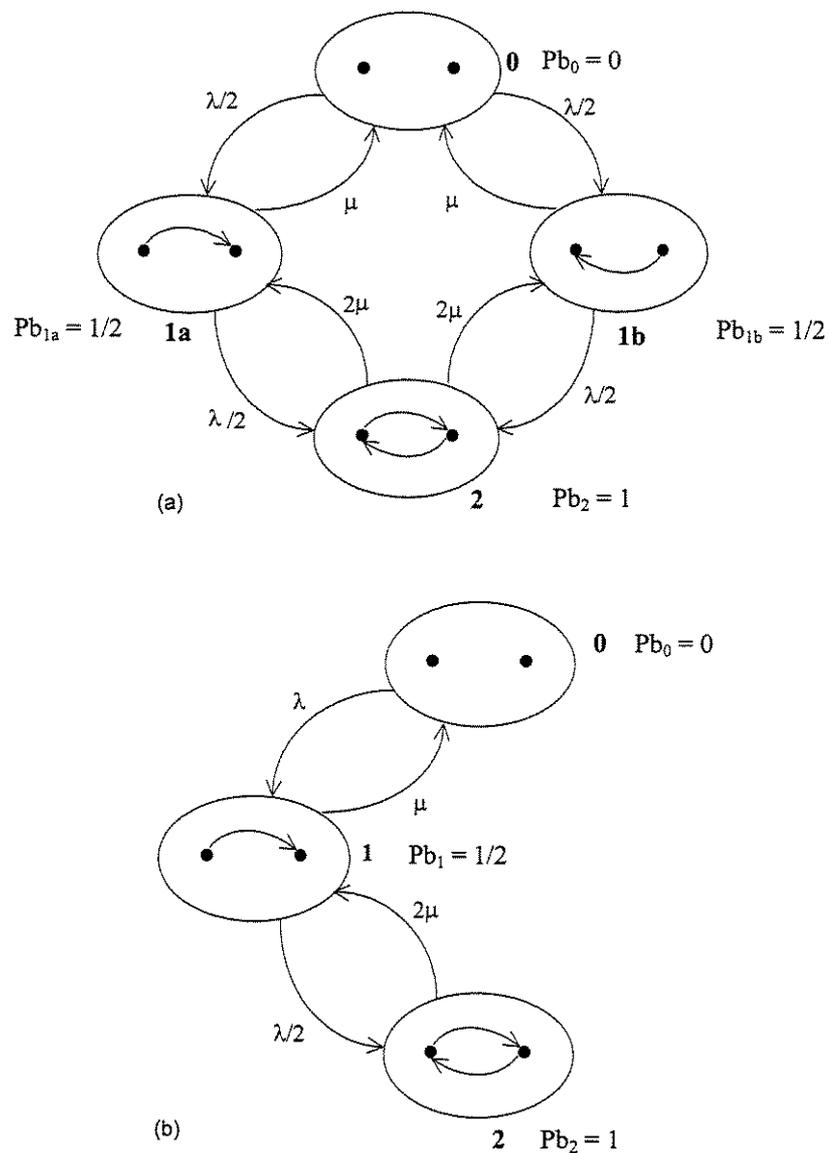


Figura 5.2 – Diagramas de estados com suas respectivas taxas de transição para uma rede WDM com dois nós e um TX/RX por nó. (a) – Diagrama de estados sem aglutinação de estados equivalentes. (b) – Diagrama de estados com aglutinação de estados equivalentes.

A probabilidade estacionária de estado q_i é a probabilidade temporal de se estar no estado i , e é proporcional a:

a) probabilidade seqüencial p_i ; e

b) tempo médio de duração de cada visita ao estado i , que é dado por:

$$T_i = \frac{1}{\sum_k \sigma_{ik}} \quad , \quad (4)$$

onde $i \neq k$ para o cálculo deste termo. Então:

$$q_i = \frac{p_i T_i}{\sum_k p_k T_k} \quad , \quad (5)$$

onde a soma é considerada para todos os estados.

A probabilidade de bloqueio total será a média temporal de todas as probabilidades de bloqueio:

$$P_b = \sum_i q_i P_{bi} \quad (6)$$

Aplicando (1) para as taxas de transição apresentadas na Figura 5.2, encontra-se a matriz de probabilidades de transição de estados para o exemplo 1:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2}{2+\tau} & 0 & \frac{\tau}{2+\tau} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

onde $\tau = \frac{\lambda}{\mu}$ representa o tráfego oferecido à rede em Erlangs.

Aplicando as Equações (2) e (3) para esta matriz encontram-se:

$$p_0 = \frac{1}{2 + \tau} \quad (8)$$

$$p_1 = \frac{1}{2} \quad (9)$$

$$p_2 = \frac{\tau}{2(2 + \tau)} \quad (10)$$

Os tempos médios de duração de cada visita ao estado i podem ser encontrados através da Equação (4), sendo dados por:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} \quad (11)$$

$$T_1 = \frac{1}{\mu + \lambda/2} \quad (12)$$

$$T_2 = \frac{1}{2\mu} \quad (13)$$

As probabilidades temporais dos estados são então encontradas através de (5):

$$q_0 = \left(\frac{2}{2 + \tau} \right)^2 \quad (14)$$

$$q_1 = \frac{4\tau}{(2 + \tau)^2} \quad (15)$$

$$q_2 = \frac{\tau^2}{(2 + \tau)^2} \quad (16)$$

Finalmente, aplicando (6) a estes últimos valores, a probabilidade de bloqueio total será dada por:

$$P_b = \frac{1}{2}q_1 + q_2 = \frac{\tau}{2 + \tau} \quad (17)$$

Considerando $\tau_0 = \tau/N$, onde τ_0 significa o tráfego da rede por nó, tem-se que, para o caso do exemplo 1, $\tau = 2\tau_0$. Aplicando esta condição em (17), tem-se que:

$$P_b = \frac{\tau_0}{1 + \tau_0} \quad (18)$$

Exemplo 2- Considere uma rede WDM com três nós, uma fibra, um transceptor por nó e conexões unidirecionais. Após a aglutinação dos estados equivalentes, encontra-se o diagrama de estados apresentado na Figura 5.3, no qual são mostradas as taxas de transição existentes na rede.

Seguindo os passos adotados no exemplo anterior, pode-se chegar ao valor da matriz probabilidade de transição de estados:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2}{2 + \tau} & 0 & \frac{\tau}{6 + 3\tau} & \frac{2\tau}{6 + 3\tau} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12}{12 + \tau} & 0 & 0 & \frac{\tau}{12 + \tau} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (19)$$

Da mesma maneira, chega-se aos valores das probabilidades seqüenciais dos estados, dadas por:

$$p_0 = \frac{18}{\tau^2 + 18\tau + 36} \quad (20)$$

$$p_1 = \frac{9\tau + 18}{\tau^2 + 18\tau + 36} \quad (21)$$

$$p_2 = \frac{3\tau}{\tau^2 + 18\tau + 36} \quad (22)$$

$$p_3 = \frac{12\tau + \tau^2}{2(\tau^2 + 18\tau + 36)} \quad (23)$$

$$p_4 = \frac{\tau^2}{2(\tau^2 + 18\tau + 36)} \quad (24)$$

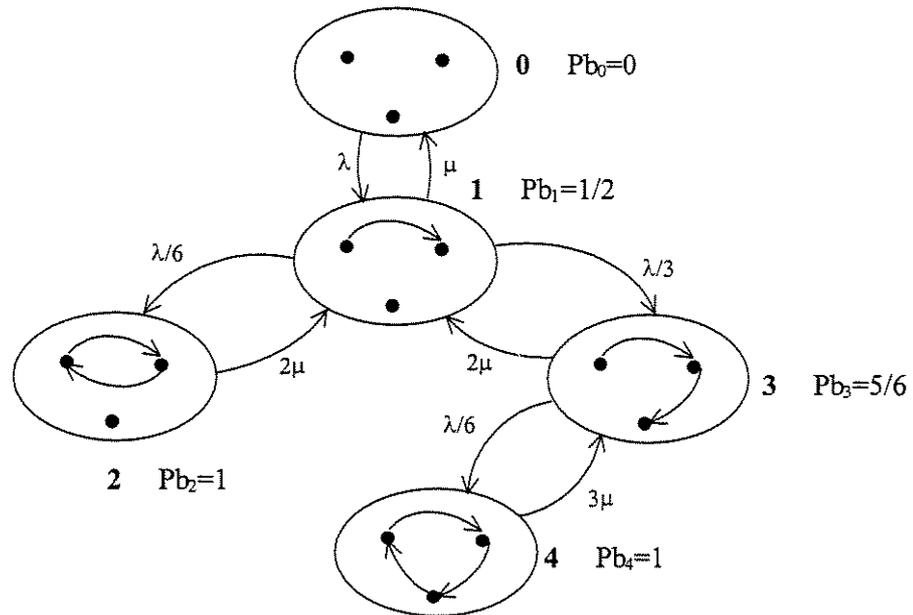


Figura 5.3 – Diagrama de estados com suas respectivas taxas de transição para uma rede WDM com três nós e um TX/RX por nó. Estados equivalentes se encontram aglutinados.

Os tempos médios de duração de cada visita ao estado i são dados por:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} \quad (25)$$

$$T_1 = \frac{1}{\mu + \lambda/2} \quad (26)$$

$$T_2 = \frac{1}{2\mu} \quad (27)$$

$$T_3 = \frac{1}{2\mu + \lambda/6} \quad (28)$$

$$T_4 = \frac{1}{3\mu} \quad (29)$$

Daí, as probabilidades temporais dos estados encontradas são:

$$q_0 = \frac{108}{\tau^3 + 27\tau^2 + 108\tau + 108} \quad (30)$$

$$q_1 = \frac{108\tau}{\tau^3 + 27\tau^2 + 108\tau + 108} \quad (31)$$

$$q_2 = \frac{9\tau^2}{\tau^3 + 27\tau^2 + 108\tau + 108} \quad (32)$$

$$q_3 = \frac{18\tau^2}{\tau^3 + 27\tau^2 + 108\tau + 108} \quad (33)$$

$$q_4 = \frac{\tau^3}{\tau^3 + 27\tau^2 + 108\tau + 108} \quad (34)$$

Portanto, chegar-se-á ao valor da probabilidade de bloqueio total da rede, que assume o seguinte valor:

$$P_b = \frac{\tau_0^3 + 8\tau_0^2 + 6\tau_0}{\tau_0^3 + 9\tau_0^2 + 12\tau_0 + 4} \quad (35)$$

Ao se analisar redes com número de nós maior que três, percebe-se que o número de estados aumenta bruscamente. Isto pode ser verificado através do diagrama de estados para uma rede com quatro nós e um transceptor por nó, o qual é mostrado na Figura 5.4. Após a aglutinação de estados equivalentes, o diagrama apresenta dez estados.

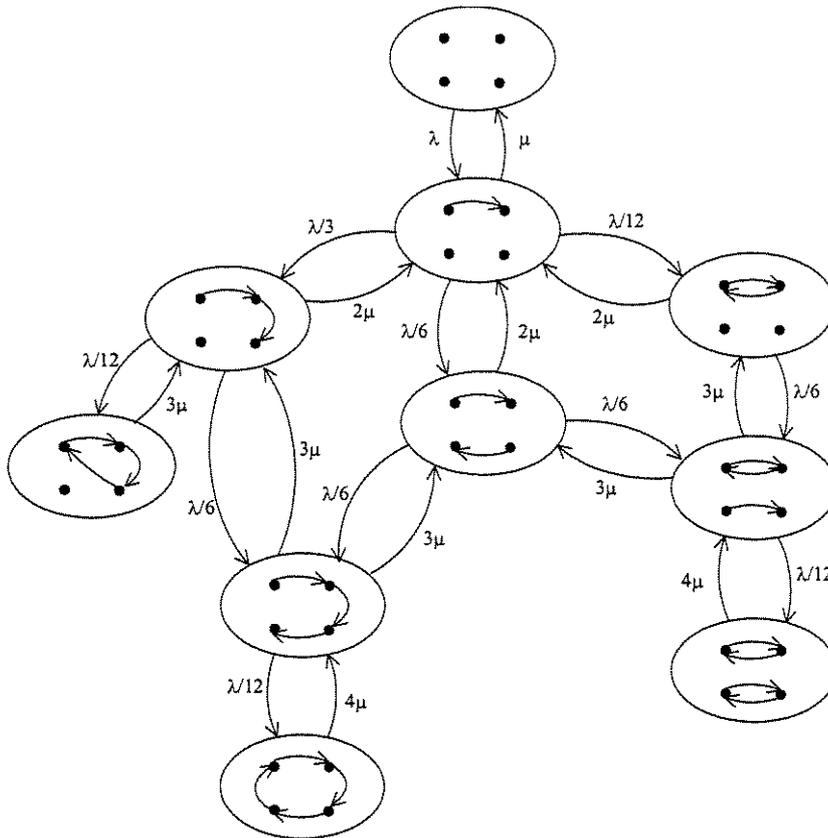


Figura 5.4 – Diagrama de estados aglutinados para uma rede WDM com quatro nós e um TX/RX por nó.

A resolução de equações a partir deste ponto passa a apresentar um nível de complexidade maior. Porém, através de cálculos computacionais, pode-se chegar aos valores das probabilidades de bloqueio total em redes WDM com quatro, cinco, seis e sete nós com um transceptor por nó, e para redes com dois transmissores por nó com dois, três e quatro nós. Estes resultados serão mostrados mais adiante.

Exemplo 3- Considere uma rede WDM a uma fibra com largura de banda infinita, um transceptor por nó, conexões unidirecionais e um número N de nós tendendo a infinito.

Considere que ρ é o valor percentual de TX's ou RX's ocupados na rede e, portanto, ρN é o número médio de TX's ou RX's ocupados na rede. Para um valor de N muito grande, tem-se que a probabilidade de uma requisição não ser bloqueada é dada por:

$$1 - P_b = (1 - \rho)(1 - \rho) = (1 - \rho)^2$$

$$\therefore P_b = 1 - (1 - \rho)^2 = 2\rho - \rho^2 \quad (36)$$

O equilíbrio se dá quando a taxa de conexões estabelecidas (natalidade) se torna igual à taxa de conexões que são desativadas (mortalidade). Portanto, no equilíbrio tem-se que:

$$\lambda(1 - P_b) = \rho N \mu$$

$$\therefore \rho = \frac{\lambda}{N \mu} (1 - P_b) = \tau_0 (1 - P_b) \quad (37)$$

As equações (36) e (37) definem uma equação polinomial de segundo grau para P_b , resultando em:

$$P_b = 1 - \frac{1 + 2\tau_0 - \sqrt{1 + 4\tau_0}}{2\tau_0^2} \quad (38)$$

Ao se analisar a mesma rede considerada no início do exemplo 3, com o número de nós N tendendo a infinito e k transceptores por nó, pode-se concluir que, semelhantemente à equação (36), a probabilidade de uma requisição não ser bloqueada é:

$$1 - P_b = (1 - \rho^k)(1 - \rho^k) = 1 - 2\rho^k + \rho^{2k} \quad (39)$$

E no equilíbrio:

$$\lambda(1 - P_b) = k\rho N\mu$$

$$\therefore \rho = \frac{\lambda}{kN\mu}(1 - P_b) = \frac{\tau_0}{k}(1 - P_b) \quad (40)$$

As equações (39) e (40) definem a seguinte equação:

$$(1 - P_b) = 1 - 2 \frac{\tau_0^k}{k^k} (1 - P_b)^k + \frac{\tau_0^{2k}}{k^{2k}} (1 - P_b)^{2k}$$

$$\therefore (1 - P_b)^{2k} - \frac{2k^k}{\tau_0^k} (1 - P_b)^k - \frac{k^{2k}}{\tau_0^{2k}} (1 - P_b) + \frac{k^{2k}}{\tau_0^{2k}} = 0 \quad (41)$$

De posse da equação (41) pode-se obter valores para probabilidades de bloqueio para redes com k transceptores por nó e N nós, N tendendo a infinito.

As equações (18), (35) e (38) estão plotadas no gráfico da Figura 5.5, juntamente com os valores obtidos através de métodos computacionais para redes com N=4, 5, 6 e 7 nós. Neste gráfico, as curvas representam o melhor desempenho, ou menor probabilidade de bloqueio, que redes WDM com um transceptor por nó podem apresentar, considerando a largura de banda infinita. Sabe-se que esta é uma situação não-real, e que redes com limitação no número de comprimentos de onda, uma situação real, apresentam desempenhos inferiores aos apresentados neste gráfico.

Para uma maior clareza, a região entre 0 e 0,25 Erlangs / nó do gráfico da Figura 5.5 pode ser observada na Figura 5.6, onde verifica-se que o melhor desempenho é apresentado para a curva onde N=2 e o pior para a curva onde N tende a infinito.

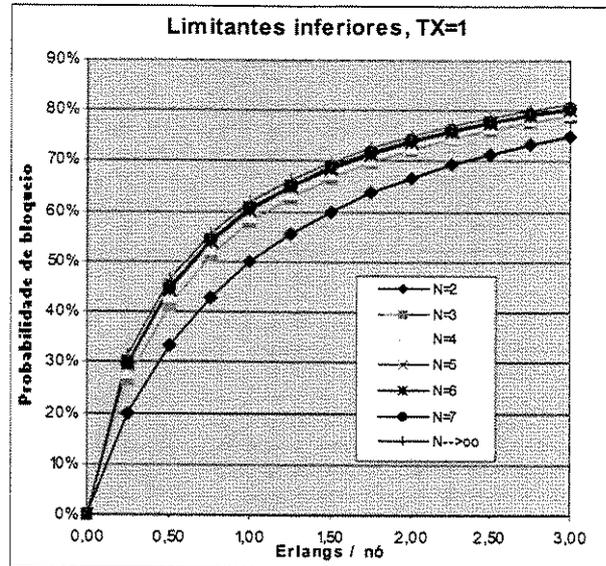


Figura 5.5 – Curvas de limitantes inferiores da probabilidade de bloqueio para redes WDM com um TX por nó, com variação do número de nós.

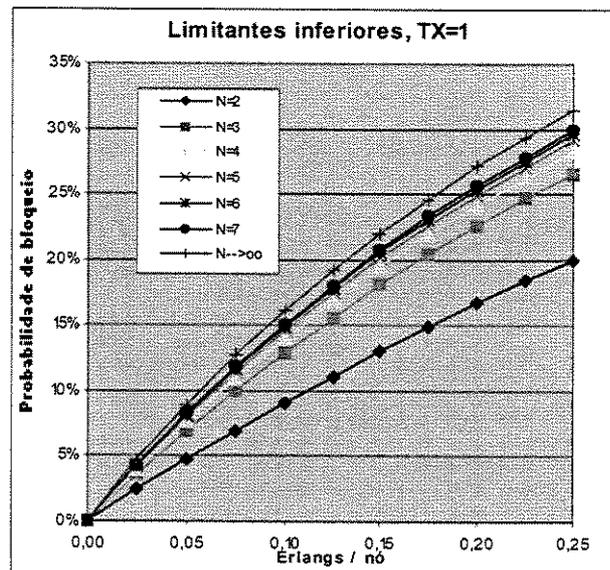


Figura 5.6 – Região ampliada de 0 a 0,25 Erlangs / nó do gráfico da Figura 5.5.

Estudos similares são apresentados para redes com dois transceptores por nó, com $N=2, 3$ e 4 nós, e N tendendo a infinito, resultado proveniente da equação (41) para $k=2$, como mostra a Figura 5.7.

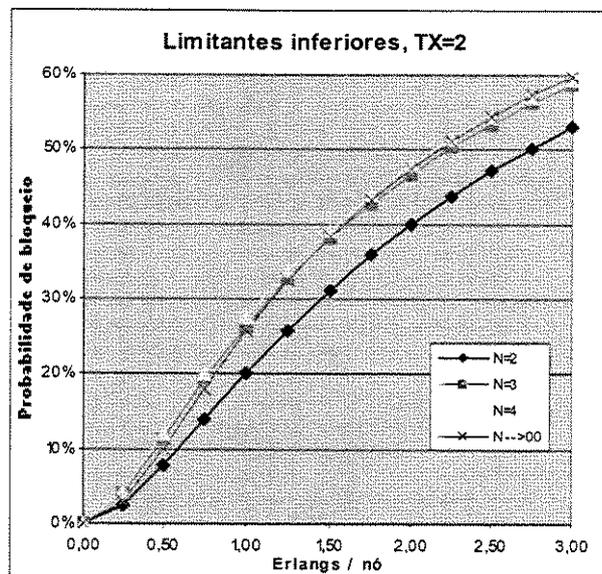


Figura 5.7 – Curvas de limitantes inferiores da probabilidade de bloqueio para redes WDM com dois TX's por nó, com variação do número de nós.

Percebe-se que a curva referente à rede com $N=2$ sempre apresenta melhor desempenho dentre as demais. Isto pode ser explicado porque as redes com $N \neq 2$ podem apresentar a configuração de isolamento de um nó, ficando este limitado em sua capacidade de conexão com os demais nós. Esta característica influencia negativamente no valor da probabilidade de bloqueio da rede. O melhor desempenho entre as demais curvas varia de acordo com o tráfego utilizado na rede.

Os valores limitantes inferiores da probabilidade de bloqueio (largura de banda infinita) sob o ponto de vista de Erlangs / nó quando N tende a infinito, com variação do número de transceptores por nó, podem ser vistos no gráfico da Figura 5.8. Estas curvas representam os melhores desempenhos que as redes com grande número de nós podem realizar. A curva para $TX=5$ apresenta a menor probabilidade de bloqueio.

O gráfico da Figura 5.9 mostra os desempenhos das curvas da Figura 5.8 sob o ponto de vista de Erlangs / transceptor. De fato, o melhor desempenho é realizado pela curva $TX=5$, pois para um determinado valor de probabilidade de bloqueio, esta curva apresenta uma maior capacidade de tráfego.

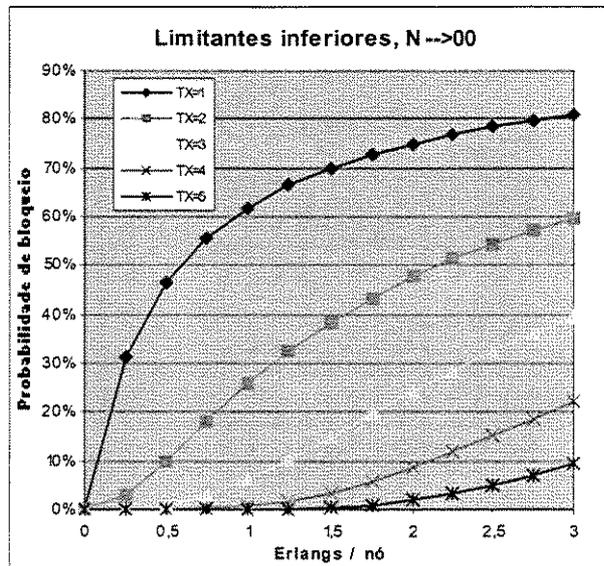


Figura 5.8 – Curvas de limitantes inferiores da probabilidade de bloqueio para redes WDM com N nós (N tendendo a infinito) com variação do número de transceptores por nó.

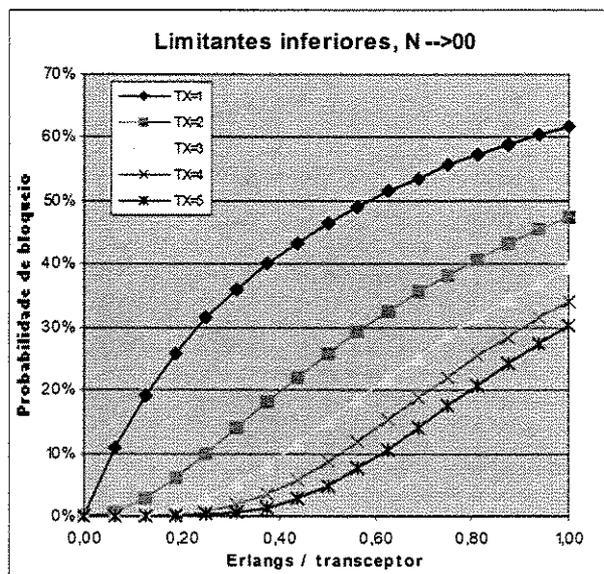


Figura 5.9– Curvas do gráfico da Figura 5.8 sob o ponto de vista de Erlangs / transceptor.

Vale salientar que os valores obtidos através de cálculos computacionais e os obtidos nos estudos analíticos aqui apresentados foram estritamente iguais.

Através da análise de redes com número de nós variando de três a sete, e um transceptor por nó, pode-se comparar a curva de desempenho obtida de uma rede com largura de banda infinita (curva de limitante inferior da probabilidade de bloqueio) com as curvas de redes com limitações no número de comprimentos de onda. Esta comparação é mostrada nos gráficos das Figuras 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14, para redes com três, quatro, cinco, seis e sete nós, respectivamente. Nestes gráficos, pode-se observar um melhor desempenho das redes com largura de banda infinita, em relação às demais redes com limitação do número de comprimentos de onda. Observa-se que, para todos os gráficos, o aumento do número de comprimentos de onda utilizados implicará num melhor desempenho da rede.

As mesmas conclusões podem ser observadas para as redes WDM com dois transceptores por nó. Os gráficos das Figuras 5.15 e 5.16 mostram o desempenho das redes para situações onde $N=3$ e 4 , respectivamente.

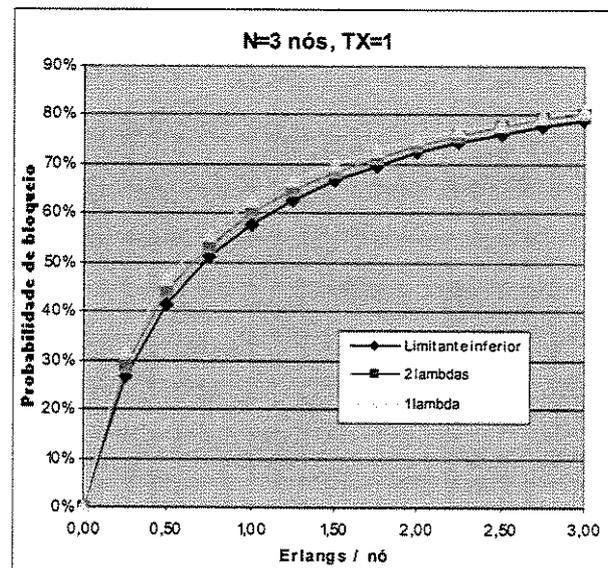


Figura 5.10 – Curva de limitante inferior da probabilidade de bloqueio para uma rede WDM com um TX por nó, três nós, e desempenhos de redes com três nós e um TX fixo por nó, com variação do número de comprimentos de onda em um e dois.

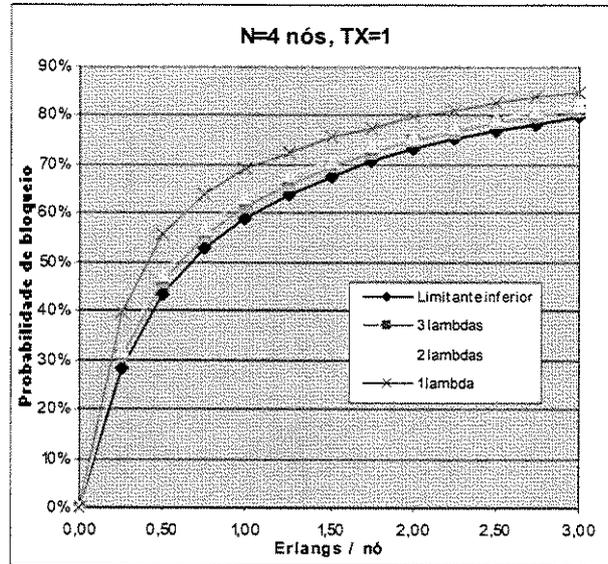


Figura 5.11 – Curva de limitante inferior da probabilidade de bloqueio para uma rede WDM com um TX por nó, quatro nós, e desempenhos de redes com quatro nós e um TX fixo por nó, com variação do número de comprimentos de onda em um, dois e três.

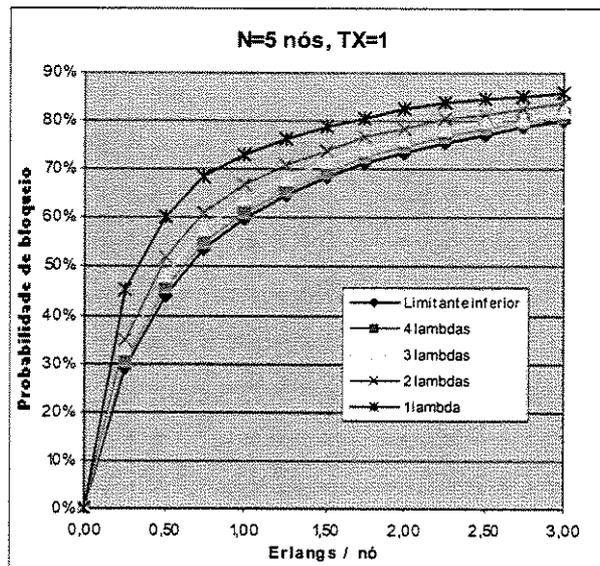


Figura 5.12 – Curva de limitante inferior da probabilidade de bloqueio para uma rede WDM com um TX por nó, cinco nós, e desempenhos de redes com cinco nós e um TX fixo por nó, com variação do número de comprimentos de onda em um, dois, três e quatro.

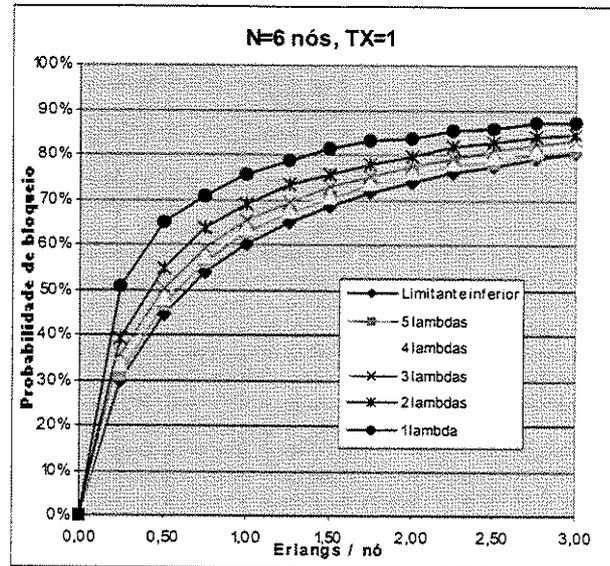


Figura 5.13 – Curva de limitante inferior da probabilidade de bloqueio para uma rede WDM com um TX por nó, seis nós, e desempenhos de redes com seis nós e um TX fixo por nó, com variação do número de comprimentos de onda em um, dois, três, quatro e cinco.

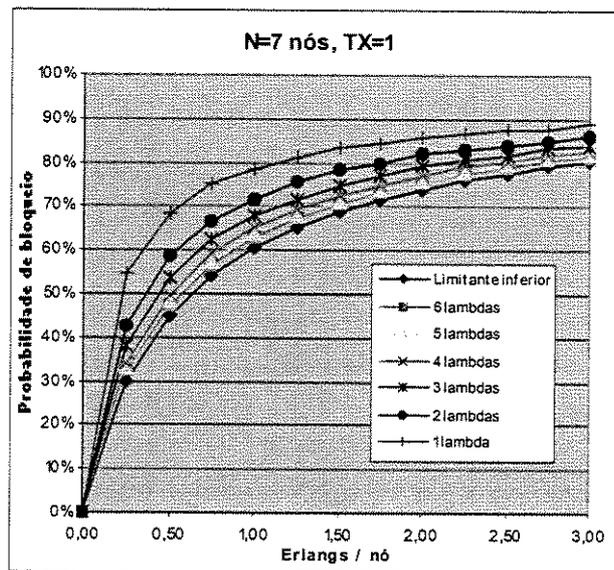


Figura 5.14 – Curva de limitante inferior da probabilidade de bloqueio para uma rede WDM com um TX por nó, sete nós, e desempenhos de redes com sete nós e um TX fixo por nó, com variação do número de comprimentos de onda em um, dois, três, quatro, cinco e seis.

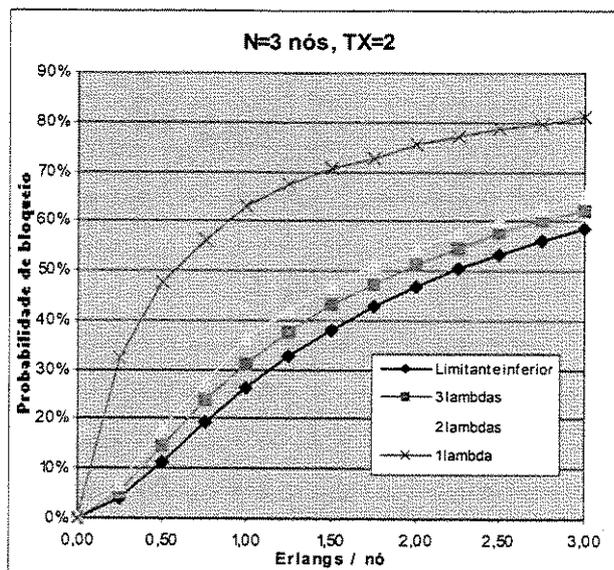


Figura 5.15 – Curva de limitante inferior da probabilidade de bloqueio para uma rede WDM com dois TX's por nó, três nós, e desempenhos de redes com três nós e dois TX's fixos por nó, com variação do número de comprimentos de onda em um, dois e três.

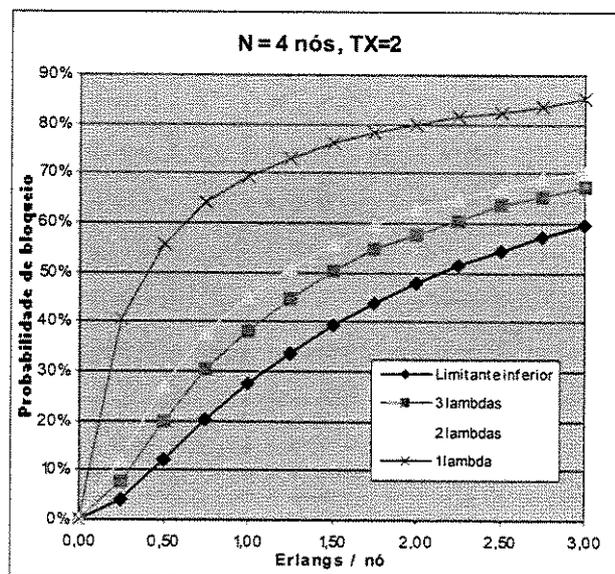


Figura 5.16 – Curva de limitante inferior da probabilidade de bloqueio para uma rede WDM com dois TX's por nó, quatro nós, e desempenhos de redes com quatro nós e dois TX's fixos por nó, com variação do número de comprimentos de onda em um, dois e três.

6 – Conclusões

Redes WDM em anel apresentam diferentes desempenhos em relação à probabilidade de bloqueio quando os números de transceptores e comprimentos de onda variam. Esta variação gera uma gama de opções que podem ser selecionadas de acordo com o desempenho e custo desejados.

Os estudos realizados nesta dissertação não levaram em conta a conversão de comprimentos de onda.

O aumento do número de transceptores por nó e o uso de “transponders” sintonizáveis contribuem positivamente com o desempenho da rede, mantida a intensidade do tráfego por nó. As simulações aqui apresentadas mostraram que existe um número ótimo de transceptores por nó que maximiza o tráfego por transceptor num anel WDM, para uma dada probabilidade de bloqueio.

As análises feitas assumindo-se um valor hipotético infinito de comprimentos de onda (largura de banda infinita) e valor limitado de transceptores por nó, revelam uma curva limitante inferior para a probabilidade de bloqueio da rede, tendo as demais redes limitadas pelos recursos nodais desempenhos inferiores aos valores desta curva.

Os estudos realizados nesta dissertação podem ser estendidos para a análise de redes WDM com outras políticas de alocação de rota e comprimento de onda (RWA – “Routing and Wavelength Assignment”).

Referências bibliográficas

[1] – I. Chlamtac, A. Ganz, and G. Karmi, “Lightpath Communication: An approach to high bandwidth optical WAN’s”, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 40, n. 7, pp. 1171-1182, July 1992;

[2] – R.A. Barry and P.A. Humblet, “Models of blocking probability in all-optical networks with and without wavelength changers”, in *Proc. IEEE INFOCOM’95*, pp. 402-412, Apr. 1995;

[3] – S. Subramaniam, M. Azizoglu, and A. K. Somani, “All-Optical Networks with Sparse Wavelength Conversion”, *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 4, no. 4, pp. 544-557, Aug. 1996;

[4] – R. Ramaswami and K.N. Sivarajan, “Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks”, *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol.3, pp. 489-500, Oct. 1995;

[5] – M. Kovacevic and A.S. Acampora, “On the Benefits of Wavelength Translation in all optical clear-channel networks”, *IEEE JSAC/JLT Special Issue on Optical Networks*, vol. 14, no. 6, pp. 868-800, June 1996;

[6] – P.E. Green Jr., “ Optical Networking Update”, *IEEE J. Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 5, pp. 764-779, June 1996;

[7] – C. Siva Ram Murthy and Mohan Gurusamy, “WDM optical networks : concepts, design and algorithms, Prentice Hall, 2002;

[8] – Govind P. Agrawal, “Fiber-Optic Communication Systems”, Wiley-Interscience, 2002;

- [9] – Andrea Borella, Giovanni Cancellieri, Franco Chiaraluce, “Wavelength Division Multiple Access Optical Networks”, Artech House Publishers, 1998;
- [10] – Byrav Ramamurthy, “Design of Optical WDM Networks : LAN, MAN and WAN Architectures”, Kluwer Academic Publishers, 2001;
- [11] – Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan, “Optical Networks : A Practical Perspective”, Morgan Kaufmann Publishers, second edition, 2002;
- [12] – W. F. Giozza, E. Conforti e H. Waldman, “Fibras Ópticas: Tecnologia e Projeto de Sistemas” Makron Books, São Paulo, 1991;
- [13] – Helio Waldman, “Redes fotônicas : uma tecnologia emergente para as comunicações ópticas”, DECOM/FEEC/UNICAMP, contrato 2500/856/98-TB;
- [14] – R. Camelo, D. R. Campelo e H. Waldman, “Alocação de Rota e Comprimento de Onda em Anéis Ópticos com Bloqueio”, anais do IX SBMO, pp 134-137, Agosto 2000;
- [15] – Paul L. Meyer, “Probabilidade – Aplicações à Estatística”, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., segunda edição, 1983;
- [16] – Thomas G. Robertazzi, “Computer Networks and Systems: Queueing Theory and Performance Evaluation”, Springer-Verlag, second edition, 1994.

Desempenho de Anéis WDM com Número Limitado de Transceptores por Nó

Filipe Guimarães Lins e Helio Waldman

Resumo— Este artigo compara os desempenhos de transmissores fixos e sintonizáveis em anéis WDM com bloqueio, nos quais todos os receptores são sintonizáveis. O desempenho da rede, com relação à probabilidade de bloqueio, é discutido para uma variação do número de transceptores por nó, os quais possuem transmissores fixos e sintonizáveis.

Palavras-Chave—WDM, transceptor, Optical Add Drop Multiplexer (OADM), first fit, sintonizabilidade.

Abstract—This paper compares the performances of fixed and tunable transmitters in WDM blocking rings, when all receivers are tunable. The blocking performance of such rings is discussed for a varying number of transceivers per node, when their transmitters are fixed and tunable.

Index Terms— WDM, transceiver, Optical Add Drop Multiplexer (OADM), first fit, tunability.

I. INTRODUÇÃO

Inicialmente a tecnologia apenas permitia o uso de poucos comprimentos de onda numa rede óptica, os quais eram implementados na rede por meio de poucos transceptores ópticos. Com a evolução da tecnologia, diversos comprimentos de onda puderam trafegar na rede ao mesmo tempo. No entanto, tornou-se inviável o uso de grande número de transceptores ópticos, devido ao seu elevado custo.

Variando-se o número e sintonizabilidade dos transceptores ópticos, desempenhos específicos podem ser obtidos ao serem analisadas as probabilidades de bloqueio para cada caso. Esses dados possibilitarão um leque de opções a serem selecionadas de acordo com desempenho e custo.

II. METODOLOGIA

Através do uso de um simulador construído em C++, diversas simulações foram realizadas e observadas, as quais permitiram atingir resultados que serão mostrados em seguida.

Filipe Guimarães Lins e Helio Waldman, Optical Networking Laboratory (URL: <http://www.optinet.fee.unicamp.br>), Departamento de Comunicações, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, E-mails: flins@decom.fee.unicamp.br, waldman@decom.fee.unicamp.br.

Considere uma rede WDM em anel com bloqueio, de duas fibras, com caminhos unidirecionais em cada fibra, com N nós e W comprimentos de onda, conforme mostra a Figura 1. Considere também que a comunicação entre nós é unidirecional. Essas características podem ser aplicadas para suportarem redes IP, como, por exemplo, rede cliente.

Simulações foram realizadas para uma rede em que $N=32$ e $W=16$.

Todos os nós são formados de OADM's (Optical Add Drop Multiplexers) [1], que são elementos ópticos multiplexadores, responsáveis pelo acréscimo ou retirada de determinados comprimentos de onda na rede.

Todos os nós na rede foram considerados idênticos, ou seja, de características semelhantes em relação ao número e sintonizabilidade de transceptores. A análise é feita a partir da variação do número de transceptores por nó, bem como a sintonizabilidade destes. Se existirem X transceptores para um determinado nó, assuma que isto implica X transmissores e X receptores para cada sentido do anel.

Foram considerados dois cenários para cada nó: 1 - Nó com receptores (RX's) sintonizáveis e transmissores (TX's) fixos, e 2 - Nó com receptores (RX's) sintonizáveis e transmissores (TX's) sintonizáveis.

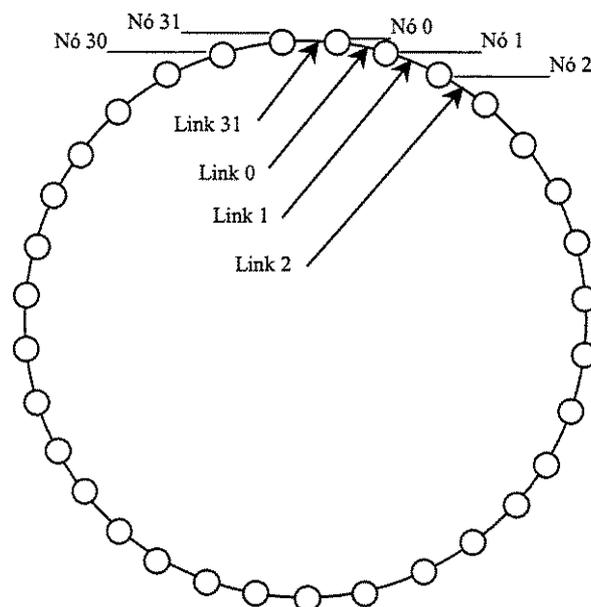


Fig. 1 : Rede WDM em anel com 32 nós.

Observe que serão utilizados receptores sintonizáveis em todos os casos, pois estes não apresentam problemas em relação a custos elevados devido à sua implementação, o que permite a recepção de qualquer comprimento de onda utilizado na rede.

Analisaremos os casos em que, em uma mesma rede, todos os nós terão um mesmo número de transceptores, sendo todos transmissores fixos ou todos sintonizáveis.

A sintonizabilidade de um transmissor permite que haja uma maior flexibilidade na rede, possibilitando a alocação de qualquer comprimento de onda dentre os disponíveis. Contudo o seu custo é bem mais elevado que o de um transmissor de sintonia fixa.

O tráfego utilizado na rede é poissoniano com taxa de chegada de requisição λ e taxa de atendimento μ , gerando uma intensidade (λ / μ) Erlangs.

O simulador sorteia aleatoriamente os nós origem e destino, o último diferente do primeiro. Para um anel, há duas possibilidades de caminho: o mais curto e o alternativo. O caminho mais curto pode ser utilizado como prioritário. Caso haja indisponibilidade deste, o caminho alternativo pode ser utilizado. Porém, para tráfego alto, observa-se que a melhor opção seria utilizar apenas o caminho mais curto e, se houver indisponibilidade deste, a requisição seria bloqueada [2]. Nas simulações deste artigo é utilizada apenas a condição de caminho mais curto. Caso não haja disponibilidade de realização da conexão, o bloqueio é atingido. Se os nós sorteados forem antípodas, serão escolhidos caminhos nos sentidos horário e anti-horário, alternadamente.

Após o sorteio dos nós origem e destino e indicação do caminho mais curto, o comprimento de onda a ser alocado terá de ser indicado. Por isso, usa-se um algoritmo do tipo " first fit " (ajuste prioritário) para se realizar essa alocação. Esse tipo de algoritmo estabelece algum critério de prioridade entre os comprimentos de onda disponíveis na rede. O algoritmo utilizado nessas simulações foi o de prioridade fixa (PF), que é do tipo "first fit", no qual uma lista de comprimentos de onda é estabelecida e, ao ser solicitada a escolha de um comprimento de onda, o primeiro da lista que não estiver sendo usado nos links específicos deverá ser alocado [2].

III. CONSIDERAÇÕES

Quando se trabalha com rede WDM em anel com transmissores fixos, é necessário saber quais comprimentos de onda serão utilizados por cada nó, mediante o leque de opções de comprimentos de onda disponíveis na rede (neste caso $W=16$). Para identificar esses comprimentos de onda, foram utilizadas duas matrizes de entrada (uma para o sentido horário e outra para o sentido anti-horário). Cada matriz (Nós x Comprimentos de onda) conterá elementos 0 e 1. O elemento 1 identificará a presença de transmissor no comprimento de onda referente à sua coluna e o nó específico referente ao número de sua linha na matriz. O elemento 0

indicará ausência de transmissor. Para as simulações neste artigo, a matriz terá grandeza ($N=32 \times W=16$). Considerando n o número de transmissores por nó, o preenchimento da matriz se dará de maneira que na linha correspondente ao nó i , $0 \leq i < N$, os elementos 1 estarão nas colunas $(i.n) \bmod W$, $(i.n + 1) \bmod W$, $(i.n + 2) \bmod W$, ... , $[(i + 1).n - 1] \bmod W$. Todos os demais elementos da linha i serão 0. O preenchimento da matriz para o caso de cinco transmissores por nó é mostrado na Figura 2.

As matrizes (Nós x Comprimentos de onda) para transmissores fixos para o sentido horário e anti-horário serão iguais e preenchidas como na Figura 2. Essas matrizes não existirão se os transmissores utilizados forem sintonizáveis, visto que estes têm a possibilidade de escolher um dos comprimentos de onda disponíveis na rede.

IV. TIPOS DE BLOQUEIO

As conexões poderão ser bloqueadas devido a uma série de sete fatores. Cada fator contribui com uma probabilidade de bloqueio parcial e a soma deles acarretará a probabilidade de bloqueio total. Esses fatores são bloqueios referentes ao :

		Comprimentos de onda																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Nós	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	
	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
	6	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	7	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
	9	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	10	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
	13	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
	16	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
	19	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	20	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
	22	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	23	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	24	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	26	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	27	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	28	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
	29	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1

Fig. 2 : Matriz (Nós x Comprimentos de onda) para cinco transmissores fixos por nó.

A. Transmissor (TX)

Neste caso se situam as conexões que não são efetivadas apenas por falta de transmissor.

B. Receptor (RX)

Neste caso se situam as conexões que não são efetivadas apenas por falta de receptor.

C. Comprimento de onda (λ)

Neste caso se situam as conexões que não são efetivadas apenas por falta de comprimentos de onda na rota desejada. No caso do uso de TX's fixos, isso implica na falta de comprimentos de onda específicos disponibilizados pelos TX's. Já no caso de TX's sintonizáveis, isso implica na falta de todos os comprimentos de onda existentes na rede.

D. Transmissor e receptor (TX_RX)

Esta situação ocorre quando não há TX nem RX disponíveis, mas com disponibilidade de comprimento de onda.

E. Transmissor e comprimento de onda (TX_λ)

Ocorre quando conexões não encontram nem TX nem comprimento de onda disponíveis, mas com disponibilidade de RX.

F. Receptor e comprimento de onda (RX_λ)

Ocorre quando conexões não encontram nem RX nem comprimento de onda disponíveis, mas com disponibilidade de TX.

G. Transmissor e receptor e comprimento de onda (TX_RX_λ)

Ocorre quando conexões não encontram nem TX, nem RX, nem comprimento de onda disponíveis.

V. SIMULAÇÕES

Com todas as informações acima citadas, foram simuladas situações numa rede em anel com 1.000.000 de requisições por simulação, em que $N=32$, $W=16$ e variação do número de transceptores por nó em 2, 3, 4, 5, 6 e 7, bem como a sintonizabilidade destes.

A Figura 3 refere-se às simulações realizadas com transmissores fixos, nos quais podemos analisar a probabilidade de bloqueio com o aumento do tráfego em Erlangs/nó, para diferentes números de transmissores. Percebe-se que o melhor desempenho é mostrado pela curva TX=7, ou seja, anel com sete transmissores por nó. Quanto maior o número de transmissores fixos por nó, menor será a probabilidade de bloqueio, mesmo que para valores mais elevados de Erlangs/nó.

As mesmas conclusões também servem para a Figura 4, na qual observamos os transmissores sintonizáveis. Contudo, percebe-se que há uma queda abrupta de valores na probabilidade de bloqueio entre as curvas TX=2 e TX=3. No ponto em que se tem o tráfego de 2 Erlangs/nó, vemos uma

redução de aproximadamente 60% na probabilidade de bloqueio de uma curva para outra. Se observarmos as curvas TX=3 e TX=4, perceberemos que essa queda é de menos de 50%. Entre TX=4 e TX=5, a queda será em torno de 20%, entre TX=5 e TX=6 em torno de 4%, e entre TX=7 e TX=6 1%. Percebe-se, neste caso, que o valor da probabilidade de bloqueio das curvas tende a uma saturação, não havendo vantagem notória a partir de determinado ponto o acréscimo de mais transmissores sintonizáveis.

Se analisarmos todas as curvas dos transmissores fixos e sintonizáveis mostradas nas Figuras 3 e 4, poderemos constatar vantagens de algumas curvas em relação a outras. Pelos gráficos, podemos concluir que é mais vantajoso utilizar, em uma rede WDM em anel com 32 nós e 16 comprimentos de onda, três transmissores fixos por nó em lugar de dois sintonizáveis, pois a curva de probabilidade de bloqueio daqueles é inferior a destes.

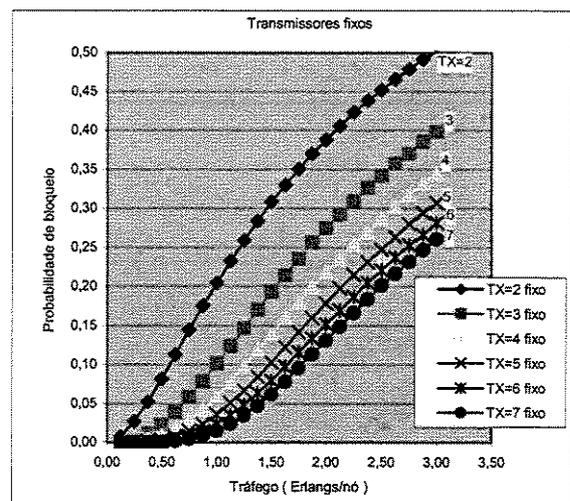


Fig. 3 : Desempenho da rede com variação do número de transmissores fixos.

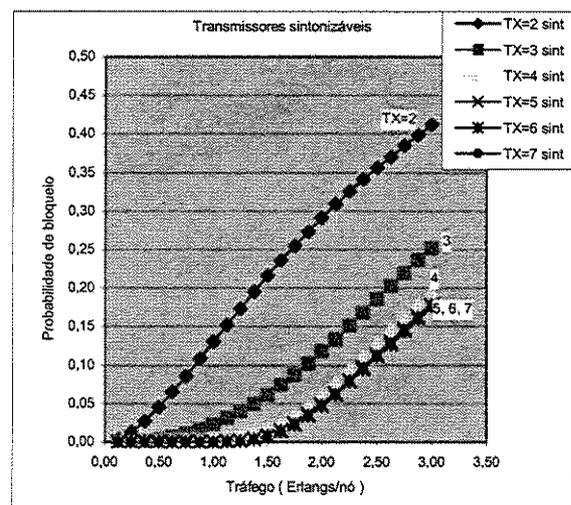


Fig. 4 : Desempenho da rede com variação do número de transmissores sintonizáveis.

Supondo-se que o valor de um transmissor sintonizável corresponda ao valor de dois transmissores fixos, podemos concluir claramente que a utilização de quatro transmissores fixos faz com que a rede apresente um melhor desempenho em relação à utilização de apenas dois transmissores sintonizáveis. Em contrapartida, o desempenho de três transmissores sintonizáveis é melhor que o de seis transmissores fixos. Portanto, várias decisões podem ser tomadas a partir da análise destes gráficos.

A diferença de desempenho entre as curvas TX=5, 6 e 7 na Figura 4 é muito pequena. Se observarmos sob o ponto de vista de Erlangs/transceptor, Figura 5, concluiremos que a curva TX=5 apresenta melhor desempenho dentre as três. Neste mesmo gráfico, observamos que o melhor desempenho foi realizado pela curva TX=3, para $P_b \geq 0,1$.

Com as mesmas simulações podemos observar a porcentagem das conexões que foram bloqueadas devido a falta de transmissor (TX), receptor (RX), comprimento de onda (Lambda), transmissor e receptor (TX_RX), transmissor e comprimento de onda (TX_Lambda), receptor e comprimento de onda (RX_Lambda) e transmissor e receptor e comprimento de onda (TX_RX_Lambda). As tabelas I e II nos mostra essas porcentagens parciais com variação do número e sintonizabilidade dos transceptores.

No caso do uso de transmissores fixos, o fato de não haver transmissores acarreta também a não-existência de comprimento de onda disponível, de maneira que o bloqueio de uma conexão nunca ocorrerá por causa apenas de falta de TX, mas, sim, por falta de TX e não-disponibilidade de comprimento de onda. De maneira análoga não haverá caso em que faltará apenas TX e RX, pois a falta de TX acarreta a não-disponibilidade de comprimento de onda. Desse modo, esse bloqueio será gerado por falta de TX, RX e comprimento de onda. Isso justifica a presença dos elementos 0,00% nas colunas TX e TX_RX da tabela I (transmissores fixos).

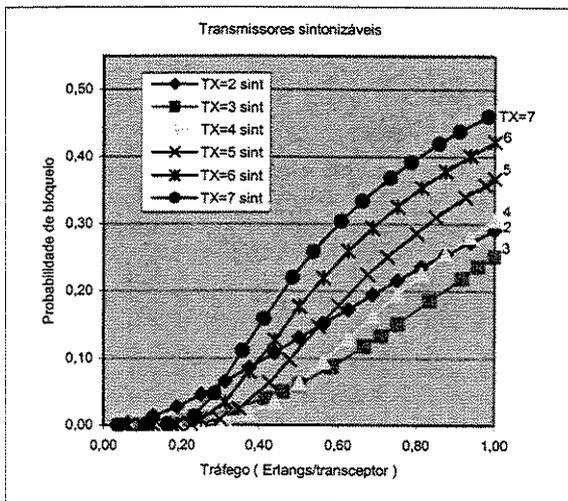


Fig. 5 : Probabilidade de bloqueio da rede com transmissores sintonizáveis versus tráfego (Erlangs / transceptor).

Na Figura 6, observamos que, para redes com dois transmissores fixos por nó, grande parte do bloqueio é gerada pelos fatores RX, Lambda e TX_Lambda. Na tabela I, percebemos que, a partir de quatro transceptores por nó, a predominância do bloqueio (> 90%) deve-se ao fator Lambda, e este valor é diretamente proporcional ao número de transceptores por nó. A Figura 7 ilustra a distribuição das porcentagens da probabilidade de bloqueio para uma rede com quatro transmissores sintonizáveis por nó.

Analisando os resultados obtidos para transmissores sintonizáveis na tabela II, observamos que há uma predominância dos fatores TX e RX para o caso de dois transmissores por nó. Para um número fixo de transmissores por nó, essa predominância cresce inversamente proporcional ao tráfego (Erlangs/nó), ocorrendo o oposto para o fator Lambda. Percebe-se que para valores mais altos de transmissores por nó, há uma predominância do fator Lambda, indicando que grande parte das conexões bloqueadas será causada por não-disponibilidade de comprimentos de onda.

VI. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

As simulações puderam comprovar o que já era previsto a respeito da melhoria do desempenho de redes WDM em anel com o aumento de transceptores ópticos por nó em relação à probabilidade de bloqueio. Pôde-se perceber as vantagens dos transmissores sintonizáveis em relação aos fixos. Os resultados de simulações foram obtidos, possibilitando análise de custo, benefício e desempenho desejados em uma rede, por meio da escolha do número e sintonizabilidade dos transceptores a serem utilizados.

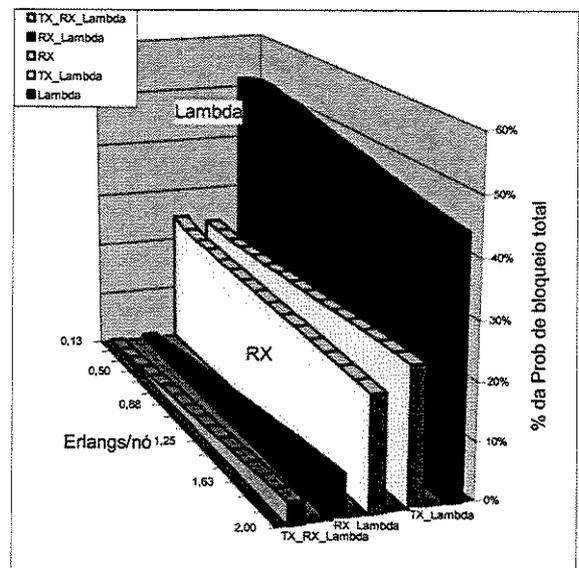


Fig. 6 : Probabilidades de bloqueio parciais para uma rede com dois transmissores fixos por nó.

TABELA I
 PORCENTAGENS DA PROBABILIDADE DE BLOQUEIO TOTAL NA REDE COM 2, 4, E 6 TRANSMISSORES FIXOS POR NÓ.

TX's :	Erlangs/nó	TX	RX	Lambda	TX RX	TX Lambda	RX Lambda	TX RX Lambda	Total
2	1	0,00%	21,92%	48,72%	0,00%	23,14%	4,24%	1,98%	100,00%
	2	0,00%	20,04%	44,35%	0,00%	24,03%	7,58%	4,00%	100,00%
4	1	0,00%	1,68%	97,10%	0,00%	0,89%	0,32%	0,00%	100,00%
	2	0,00%	1,91%	95,94%	0,00%	1,17%	0,96%	0,01%	100,00%
6	1	0,00%	0,06%	99,90%	0,00%	0,03%	0,01%	0,00%	100,00%
	2	0,00%	0,06%	99,87%	0,00%	0,01%	0,05%	0,00%	100,00%

TABELA II
 PORCENTAGENS DA PROBABILIDADE DE BLOQUEIO TOTAL NA REDE COM 2, 4 E 6 TRANSMISSORES SINTONIZÁVEIS POR NÓ.

TX's :	Erlangs/nó	TX	RX	Lambda	TX RX	TX Lambda	RX Lambda	TX RX Lambda	Total
2	1	47,51%	47,55%	0,00%	4,94%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
	2	44,69%	44,82%	0,11%	10,21%	0,06%	0,07%	0,04%	100,00%
4	1	46,82%	49,76%	2,88%	0,22%	0,19%	0,09%	0,03%	100,00%
	2	17,07%	17,34%	61,08%	0,30%	2,08%	2,05%	0,08%	100,00%
6	1	7,18%	13,26%	79,56%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
	2	0,45%	0,52%	98,74%	0,00%	0,16%	0,13%	0,00%	100,00%

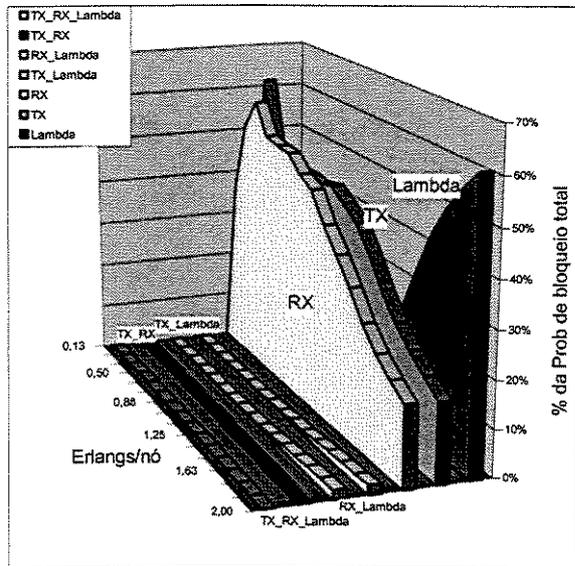


Fig. 7 : Probabilidades de bloqueio parciais para uma rede com quatro transmissores sintonizáveis por nó.

Os estudos realizados neste artigo podem ser explorados para se obter outras análises a partir de diferentes tipos de tráfego e algoritmos de alocação de comprimento de onda, podendo ser abordados como tópicos em uma outra ocasião.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Ramaswami e K. N. Sivarajan, *Optical Networks : A Practical Perspective*, Morgan Kauffmann Publishers, 2002.
- [2] R. Camelo, D.R. Campelo e H. Waldman, " Alocação de Rota e Comprimento de Onda em Anéis Ópticos com Bloqueio ", Anais do IX SBMO, pp. 134-137, August 2000.

Anel WDM com número de comprimentos de onda e transceptores limitado

Filipe G. Lins e Helio Waldman

*Optical Networking Laboratory (URL: <http://www.optinet.fee.unicamp.br>), Departamento de Comunicações,
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, E-mails:
flins@decom.fee.unicamp.br, waldman@decom.fee.unicamp.br.*

Este trabalho analisa o desempenho de um anel WDM com bloqueio quando os números de transceptores ópticos e comprimentos de onda utilizados na rede são limitados. A sintonizabilidade dos transceptores ópticos é outro fator importante que influencia na performance desta rede.

1. Introdução

Inicialmente a tecnologia apenas permitia o uso de poucos comprimentos de onda numa rede óptica. Com a evolução da tecnologia, diversos comprimentos de onda puderam trafegar na rede ao mesmo tempo. No entanto, tornou-se inviável o uso de grande número de transceptores ópticos, devido ao seu elevado custo.

Variando-se o número e sintonizabilidade dos transceptores ópticos, desempenhos específicos podem ser obtidos ao serem analisadas as probabilidades de bloqueio para cada caso. Esses dados possibilitarão um leque de opções a serem selecionadas de acordo com desempenho e custo.

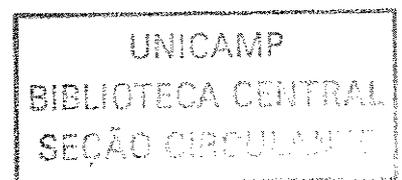
2. Metodologia e considerações

Através do uso de um simulador construído em C++, diversas simulações foram realizadas e observadas, as quais permitiram atingir resultados que serão mostrados em seguida.

Considere uma rede WDM em anel com bloqueio, de duas fibras, com caminhos unidirecionais e opostos em cada fibra, com N nós e W comprimentos de onda. Simulações foram realizadas para uma rede em que $N=32$ e $W=16$.

Algumas considerações para esta mesma rede:

- Todos os nós na rede são formados de OADM's [1] e são considerados idênticos, ou seja, de características semelhantes em relação ao número e sintonizabilidade de transceptores;
- Se existem X transceptores para um determinado nó, assuma que isto implica X transmissores e X receptores para cada sentido do anel;
- O tráfego utilizado na rede é poissoniano com taxa de chegada de requisição λ e taxa de atendimento μ , gerando uma intensidade (λ / μ) Erlangs;
- A condição de caminho mais curto para as requisições é utilizada neste trabalho;



- O algoritmo utilizado para a alocação de comprimento de onda é o PF (prioridade fixa), que é do tipo ' first fit ' [2];
- Todos os receptores (RX's) são considerados totalmente sintonizáveis e os transmissores (TX's) podem ser totalmente sintonizáveis ou fixos em comprimentos de onda específicos.

3. Tipos de bloqueio

Os bloqueios gerados na rede são causados por uma série de nove fatores, conforme mostra a tabela I.

	TX	RX	Lambda
TX	X	OK	OK
RX	OK	X	OK
Lambda	OK	OK	X
TX_RX	X	X	OK
TX_lambda	X	OK	X
RX_lambda	OK	X	X
TX_RX_lambda	X	X	X
ICP	OK	OK	OK
ICP_RX	OK	X	OK

Probabilidades de bloqueio parciais

OK - disponível
X - não disponível

Tabela I – Probabilidades de bloqueio parciais da probabilidade de bloqueio total.

Observe que o fator TX representa a probabilidade de bloqueio parcial que foi gerada por não disponibilidade de TX, porém com disponibilidade de RX e Lambda (comprimento de onda). De maneira análoga, os outros fatores são analisados. Perceba que os fatores ICP e ICP_RX estão presentes apenas quando transmissores fixos são utilizados. ICP (InComPatibilidade) significa que existem RX, TX e Lambda disponíveis na rede, porém os dois últimos são incompatíveis entre si. ICP_RX significa disponibilidade de TX e Lambda, porém incompatíveis, e não disponibilidade de RX.

4. Simulações

Foram consideradas 1.000.000 de requisições por simulação, em que N=32, W=16 e variação do número de transceptores por nó em 2, 3, 4, 5, 6 e 7, bem como a sintonizabilidade destes. A Figura 1 refere-se às simulações realizadas com transmissores fixos, para diferentes números de transmissores por nó. Percebe-se que o melhor desempenho é mostrado pela curva TX=7, ou seja, anel com sete transmissores por nó. Quanto maior o número de transmissores fixos por nó, menor será a probabilidade de bloqueio, mesmo que para valores mais elevados de Erlangs/nó. As mesmas conclusões também servem para a Figura 2, na qual observamos os transmissores sintonizáveis. Observe que as curvas tendem a uma saturação a partir de TX=5, não havendo vantagem notória o acréscimo de mais transmissores sintonizáveis.

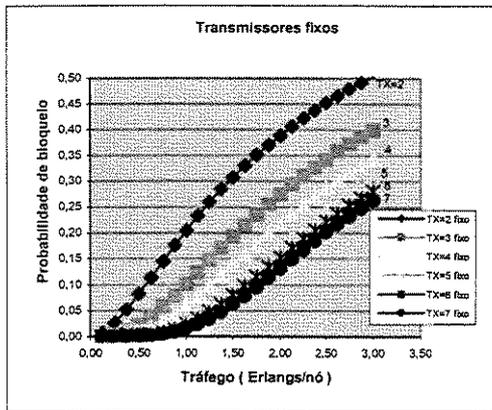


Figura 1 – Desempenho da rede com variação do número de transmissores fixos por nó.

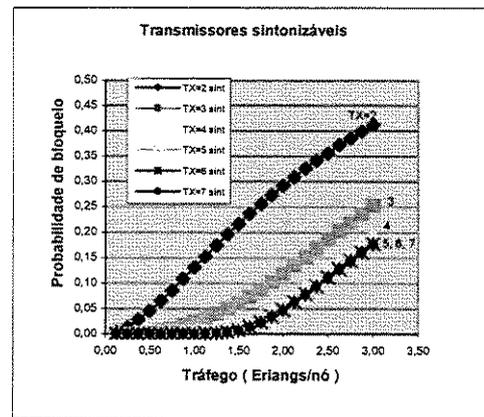


Figura 2 – Desempenho da rede com variação do número de transmissores sintonizáveis por nó.

Com as mesmas simulações podemos observar a percentagem das requisições bloqueadas devido aos fatores analisados no item 3. Este cenário é mostrado nas figuras 3 e 4.

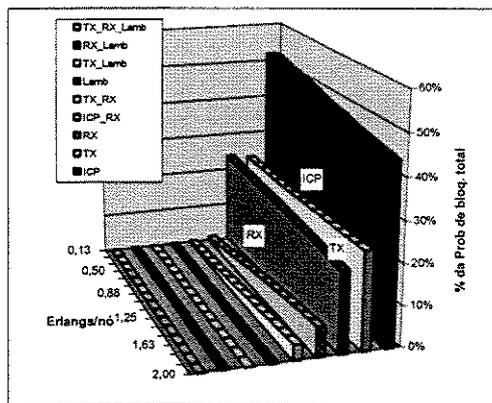


Figura 4 - Probabilidades de bloqueio parciais para uma rede com 2 transmissores fixos por nó

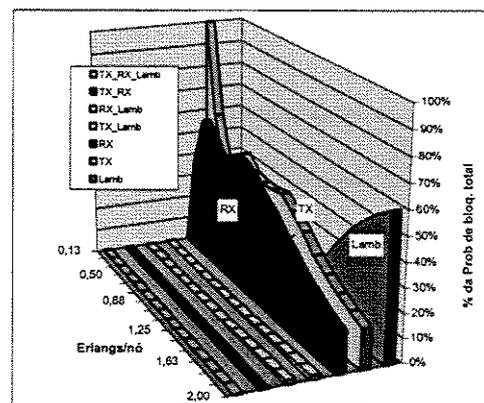


Figura 5 - Probabilidades de bloqueio parciais para uma rede com 4 transmissores sintonizáveis por nó

5. Conclusões

As simulações puderam comprovar o que já era previsto a respeito da melhoria do desempenho de redes WDM em anel com o aumento de transceptores ópticos por nó em relação à probabilidade de bloqueio. Pôde-se perceber as vantagens dos transmissores sintonizáveis em relação aos fixos.

Referências

1. R. Ramaswami e K. N. Sivarajan, *Optical Networks: A Practical Perspective*, Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
2. R. Camelo, D.R. Campelo e H. Waldman, "Alocação de Rota e Comprimento de Onda em Anéis Ópticos com Bloqueio", *Anais do IX SBMO*, pp. 134-137, Agosto 2000.

BLOCKING IN WDM NETWORKS UNDER LIMITATIONS IN THE NUMBER OF TRANSCEIVERS PER NODE

H. Waldman and Filipe G. Lins
Optical Networking Laboratory – OptiNet
Department of Communications - DECOM
School of Electrical and Computer Engineering – FEEC
State University of Campinas – UNICAMP, Campinas, Brazil.
<http://www.optinet.fee.unicamp.br>

Abstract: This paper discusses the blocking behavior of WDM networks in which the number of transceivers per node is not unlimited. We start with the extreme situation of "infinite bandwidth" networks, in which blocking is only due to lack of available terminal equipment (receiver and/or transmitter). The performance of such networks is derived analytically, thus setting a lower bound on the blocking probability of any real network with the same amount of terminal ports. We then use simulations to investigate the relative importance of blocking by the nodes and by the shortage of wavelengths in the fiber. The simulations point to the existence of an optimal number of transceivers per node in the maximization of traffic per transceiver for a given blocking probability.

Key words: WDM, first fit, blocking probabilities, transceivers.

1. INTRODUCTION

The evolution of optical networks is driven by traffic growth, which is sustained by the emergence of new applications and the engagement of new users. This process is now well established, leading to an expectation of steady growth in the coming years.

Currently, the technology of choice to meet the challenge of ever growing capacity is WDM. Wavelength routing networks are capable of carrying traffic in optical paths, which create transparent connections between any pair of nodes. In order to establish a path, however, two types

of resources must be there : a) at least one wavelength must be available in at least one fiber of each span traversed by the requested path and, in the absence of wavelength conversion capability, all such wavelengths must be the same; b) a transmitter must be available at the source node, a receiver must be available at the destination node, and they must be both tuned to the path initial and final wavelengths, respectively. Blocking will occur if any one of these conditions cannot be met.

The issue of blocking in WDM networks has been extensively studied [1-5], with a special focus on the wavelength continuity constraint in networks without wavelength conversion. Accordingly, most studies have aimed at the characterization of blocking by the exhaustion of wavelength resources at the fiber plant, as opposed to the back of transceiver resources at the nodes. When this is done, the corresponding results assume that there are enough transceivers at each node to support all terminating or originating paths that are not blocked by the network. If W is the size of the wavelength pool, assumed to be equal to the maximum fiber load, and Δ is the nodal out-and-in degree, at least $W\Delta$ transceivers per node are needed to support this assumption.

Since transceivers are responsible for a sizeable portion of the cost of the nodes, the escalation of the wavelength number into the tens and hundreds makes this assumption unrealistic. Beside, deploying enough transceivers so as to make the nodes nonblocking may be quite inefficient, as most transceivers may remain inactive most of the time. This is a motivation to investigate the blocking behavior of WDM networks with a limited number of transceivers per node.

As bit rates escalate, transceivers become even more expensive. As electronics costs tend to fall down more slowly than photonics [6], they may concentrate most network costs in the future. Besides, overbuilding the fiber plant is a natural strategy to make the network ready for fast deployment, thus concentrating the capacity bottlenecks at the nodes.

In this paper, we investigate the blocking behavior for two cases of networks with limited nodal resources. In section II, we consider an "infinite bandwidth network", i.e., a network that always has enough wavelength resources in the fiber plant so as never to block any request for lack of them : blocking will then occur only for lack of nodal resources. In section III, we consider an intermediate situation between the infinite bandwidth and unlimited nodal resources limits, represented by a WDM ring with 32 nodes, 16 wavelengths, and a variable number of transceivers per node (from 2 to 7). Section IV brings some final comments and conclusions.

2. INFINITE BANDWIDTH NETWORKS

Let us consider a network with enough wavelength resources to support any request for a path, so that blocking will occur only due to lack of an available receiver or transmitter at the destination and source nodes, respectively. We shall assume Poissonian arrivals for new requests with rate λ , evenly distributed among all source-destination pairs. Connections last for an exponentially distributed time with mean $(1/\mu)$. Blocking probabilities may then be derived from a Markovian system characterized by a set of network nodal configurations and transitions between them. Transition probabilities are derived from arrival and departure rates. Instantaneous blocking probabilities are state-dependent, so that the mean blocking probability is derived from steady-state probabilities of the system being at each state in time. The following examples clarify the method out line above.

Example 1 – Let us consider a 2-node network with only one transceiver per node, one fiber and unidirectional connections. If A and B are the two nodes, we might consider the existence of 4 configurations:

- 0 : no connection active;
- 1a : connection AB active;
- 1b : connection BA active;
- 2 : connections AB and BA active.

Notice that configurations (states) 1a and 1b are equivalent, in the sense that both have the same blocking probability $1/2$, and their rates to and from all other states are the same. Therefore, we can lump them into one state 1, resulting in the finite-state diagram shown in Figure 1.

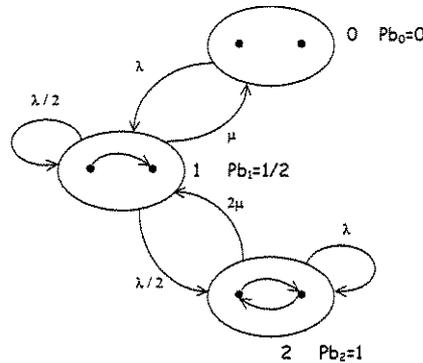


Figure 1. Finite-state diagram for a 2-node network with one transceiver per node.

Each transition in Figure 1 is labeled by the corresponding rate. If σ_{ij} is the rate of the transition from state i to state j , then the transition probability from i to j will be :

$$p_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sum_k \sigma_{ik}} \quad (1)$$

The transition probabilities obtained from (1) define a transition matrix $A = \{ p_{ij} \}$. We define the sequential state probability p_i as the steady-state probability that state i is found in the discrete sequence states. The sequential state probability vector $\mathbf{p} = (p_0, p_1, p_2)$ may then be obtained from the following equations :

$$\mathbf{p} = \mathbf{p} \cdot \mathbf{A} \quad (2)$$

$$\mathbf{p} \cdot \mathbf{1} = 1 \quad (3)$$

where $\mathbf{1}$ is an all-one's column vector.

The steady-state probability q_i that state i is found in time is proportional :

a) to the probability p_i that state i is found in the sequence of states; and

b) to the mean duration of each visit to state i , which is given by :

$$T_i = \frac{1}{\sum_k \sigma_{ik}} \quad (4)$$

Therefore :

$$q_i = \frac{p_i T_i}{\sum_k p_k T_k} \quad (5)$$

where the summations are taken over all states.

The mean blocking probability is then the time average of all state-dependent blocking probabilities :

$$P_b = \sum_i q_i P_{bi} \quad (6)$$

Applying (1) to the transition rates in Figure 1, we derive the following transition probability matrix for Example 1:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2}{2+\tau} & 0 & \frac{\tau}{2+\tau} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

where $\tau = \frac{\lambda}{\mu}$ is the network offered traffic in Erlangs.

Applying Eqs. (2) and (3) to this matrix yields :

$$p_0 = \frac{1}{2+\tau} \quad (8)$$

$$p_1 = \frac{1}{2} \quad (9)$$

$$p_2 = \frac{\tau}{2(2+\tau)} \quad (10)$$

Using (4), the mean duration of each visit to states 0, 1 and 2 are obtained from the rates that label the arrows in Figure 1 :

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} \quad (11)$$

$$T_1 = \frac{1}{\mu + \lambda/2} \quad (12)$$

$$T_2 = \frac{1}{2\mu} \quad (13)$$

The state probabilities in time are then obtained from (5) :

$$q_0 = \left(\frac{2}{2+\tau} \right)^2 \quad (14)$$

$$q_1 = \frac{4\tau}{(2+\tau)^2} \quad (15)$$

$$q_2 = \frac{\tau^2}{(2+\tau)^2} \quad (16)$$

Finally, application of (6) will yield the mean blocking probability :

$$P_b = \frac{1}{2}q_1 + q_2 = \frac{\tau}{2+\tau} \quad (17)$$

For the purpose of comparing (17) with the performance of larger networks, it is convenient to express P_b in terms of the traffic per node $\tau_0 = \tau/N$. Making $\tau = 2\tau_0$ in (17) yields :

$$P_b = \frac{\tau_0}{1+\tau_0} \quad (18)$$

Example 2 – Let us now consider a network with 3 nodes, one fiber, one transceiver per node, and unidirectional connections. With evenly distributed requests, only 5 classes of equivalent states are identified, as shown in Figure 2.

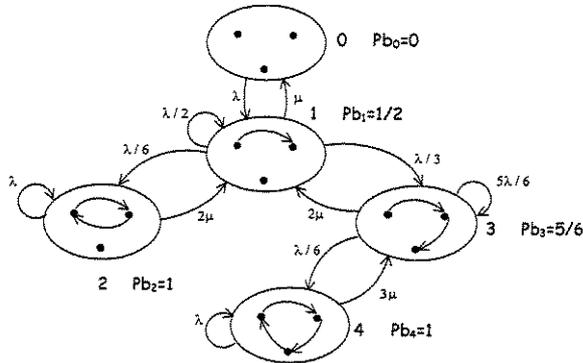


Figure 2. Finite-state diagram for a 3-node network with one transceiver per node.

The state-dependent, instantaneous blocking probabilities are shown in Figure 2, next to each state. Performing all the steps already explained in the previous example will yield the following expression for the mean blocking probability as a function of the traffic per node:

$$P_b = \frac{\tau_0^3 + 8\tau_0^2 + 6\tau_0}{\tau_0^3 + 9\tau_0^2 + 12\tau_0 + 4} \quad (19)$$

Example 3 – Let us consider an infinite bandwidth network with a very large number N of nodes that will be taken to infinity in order to derive an asymptotic expression for the blocking probability as a function of the traffic per node.

Let ρN be the mean number of busy transmitters or receivers in the network. For very large N , the time-varying relative deviation of the number of receivers / transmitters from its mean is vanishingly small, so the probability of a request not being blocked is :

$$\begin{aligned} 1 - P_b &= (1 - \rho)(1 - \rho) = (1 - \rho)^2 \\ \therefore P_b &= 1 - (1 - \rho)^2 = 2\rho - \rho^2 \quad (20) \end{aligned}$$

In equilibrium the rate of accomodation of newly requested paths is matched by the rate at which active paths are torn down, so :

$$\begin{aligned} \lambda(1 - P_b) &= \rho N \mu \\ \therefore \rho &= \frac{\lambda}{N\mu}(1 - P_b) = \tau_0(1 - P_b) \quad (21) \end{aligned}$$

Equations (20) and (21) define a second-order polynomial equation for P_b , resulting in :

$$P_b = 1 - \frac{1 + 2\tau_0 - \sqrt{1 + 4\tau_0}}{2\tau_0^2} \quad (22)$$

Equations (18), (19) and (22) are plotted in Figure 3, together with similar results (one transceiver per node) obtained with the same method for networks with $N = 4, 5, 6$ and 7 nodes. Unfortunately the number of states in the finite-state machine that describes the system runs away rapidly

when N is increased, making the method computationally harder for larger networks.

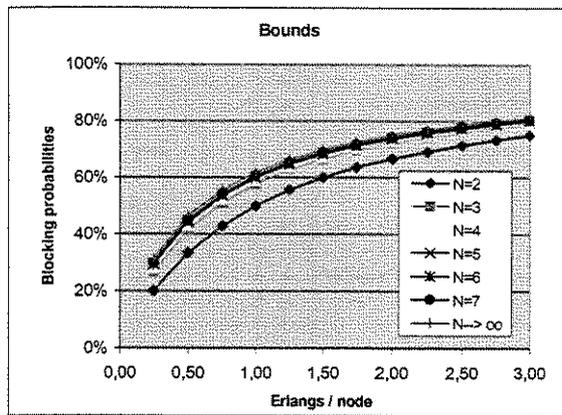


Figure 3. Blocking probabilities for infinite bandwidth networks with N nodes and one transceiver per node.

Similar results may be obtained for networks with more than one transceiver per node, as shown in Figure 4 for two transceivers per node. However, the number of states will run away even more rapidly as N is taken to larger values.

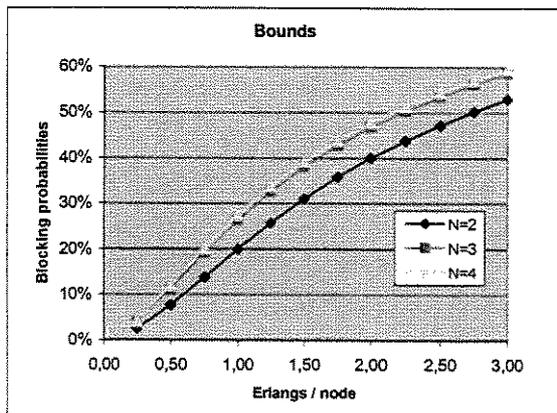


Figure 4. Blocking probabilities for infinite bandwidth networks with N nodes and two transceivers per node.

The performance obtained for the infinite bandwidth network generates a lower bound on the blocking probability of any real network with the same number of nodes and transceivers per node. This is illustrated in Figure 5, which shows the blocking probability of 5-node rings with one transceiver per node and a varying size of the wavelength pool, assuming fixed tuning transmitters and tunable receivers. Notice that performance approaches the lower bound as the number of wavelengths is increased to five, for which this particular network becomes nonblocking.

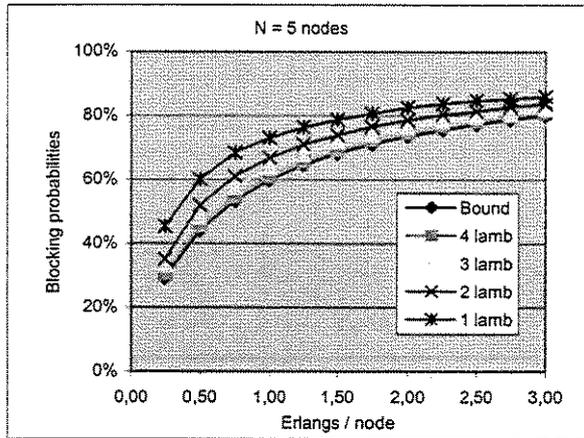


Figure 5. Blocking probabilities for infinite bandwidth networks and other networks that use limited number of wavelengths (all networks with 5 nodes and one transceiver per node).

3. FINITE BANDWIDTH NETWORK WITH NODAL RESOURCES.

In this section, we consider an intermediate case between the node-limited (infinite bandwidth) network of the previous Section and the fiber-limited (unlimited transceiver resources) usually assumed in the literature [1-5]. The case under investigation is a WDM ring network with $N = 32$ nodes and $W = 16$ wavelengths (lambda's), with bi-directional links and connections. All nodes have similar characteristics (same number of transceivers with the same tunability : either fixed or tunable). All nodes have the same number of receivers (RX's) and transmitters (TX's), called the number of transceivers per node. All receivers are tunable and the transmitters may be fixed or tunable. Poissonian traffic is used in this

network and a first fit algorithm is used to assign wavelengths: among the available wavelengths, the algorithm assigns the wavelength with the lowest index in a fixed priority list. Routing is done exclusively through shortest paths. When there are two shortest paths (a half ring), the algorithm alternates between them.

We analyse this network for fixed and totally tunable transmitters (they can use any available wavelength in the network) with totally tunable receivers. We can see the variation of blocking probability with traffic intensity per node for a varying number of fixed transmitters and tunable transmitters in Figures 6 and 7, respectively. Clearly, we see that the performance of tunable transmitters is better than fixed ones. We also observe in Figure 7 that there is a saturation curve, showing that there is almost no gain in adding additional transceivers in the network after a certain number of them has already been deployed.

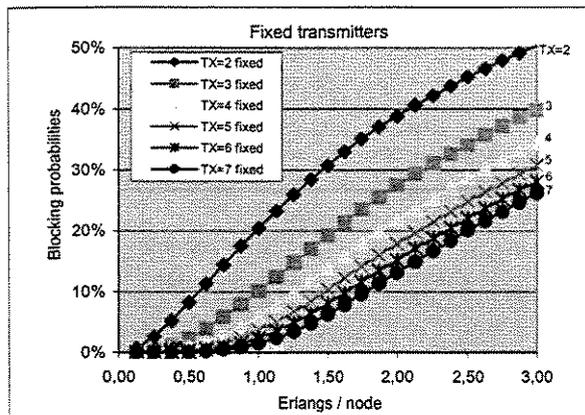


Figure 6. Performance of a 32-node WDM ring with 16 wavelengths and fixed transmitters.

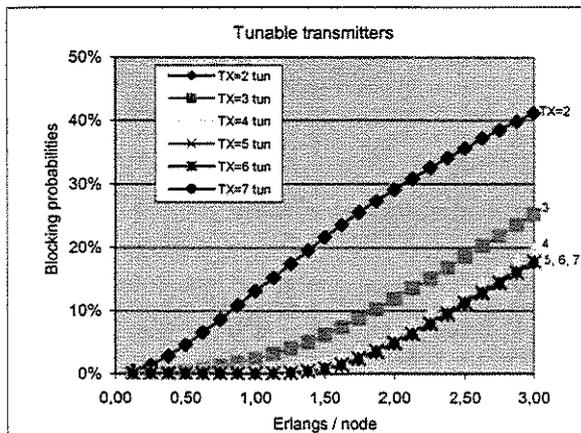


Figure 7. Performance of a 32-node WDM ring with 16 wavelengths and totally tunable transmitters.

We can see in Figure 8 the performance of the network when the traffic Erlangs/transceiver is observed. For higher values of 0,5 Erlangs/transceiver the best curve is TX=3.

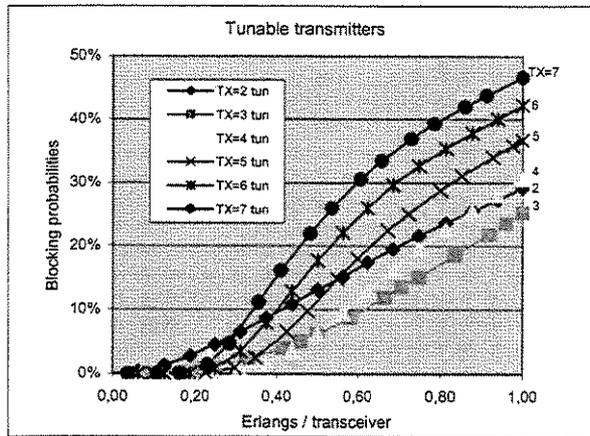


Figure 8. Blocking probabilities for a network with tunable transmitters versus Erlangs / transceiver.

Blocking may occur in nine situations, which are shown in the Table I. Observe that X means not available and OK means available. So, the partial blocking TX means that there are available RX and Lambda, but not available TX in the network. The blocking conditions ICP and ICP_RX are present only when fixed tuning transmitters are used in the network. ICP (InComPatibility) means that there are at least one available transmitter and one available wavelength for the requested path, but they are incompatible; and ICP_RX means that, besides, there is also no available receiver at the destination node.

	TX	RX	Lambda
TX	X	OK	OK
RX	OK	X	OK
Lambda	OK	OK	X
TX RX	X	X	OK
TX lambda	X	OK	X
RX lambda	OK	X	X
TX RX lambda	X	X	X
ICP	OK	OK	OK
ICP_RX	OK	X	OK

Table I. Partial blocking probabilities on the total blocking probability.

The partial contributions of all nine blocking conditions on the total blocking probability can be viewed in Figures 9 and 10, for a network with 2-fixed TX's per node and 4-tunable TX's per node, respectively. Figure 9 shows that the ICP condition yields a strong contribution to the blocking probability. In Figure 10 we observe that the strongest contributions for blocking are TX and RX for low traffic and lack of available wavelengths for high traffic.

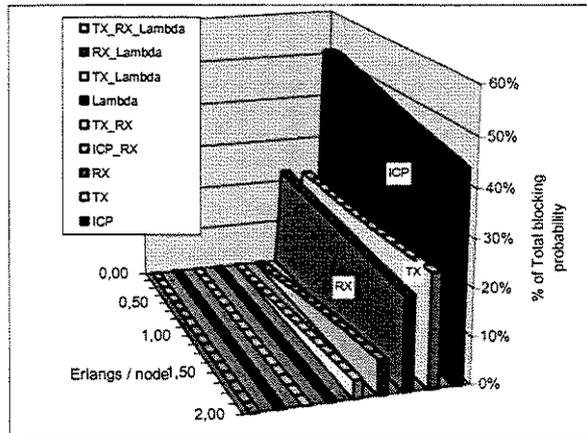


Figure 9. Partial blocking probabilities for a WDM ring with two fixed transmitters per node.

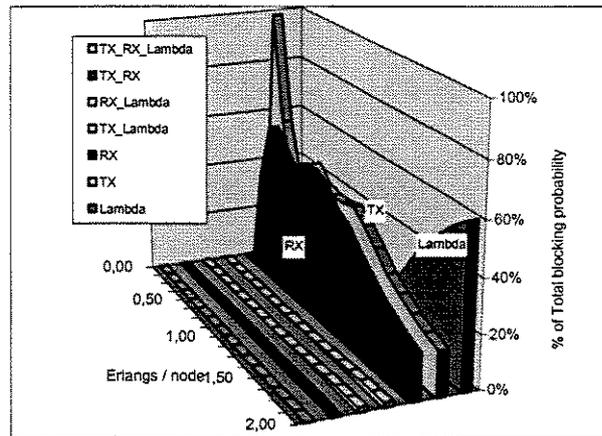


Figure 10. Partial blocking probabilities for a WDM ring with four tunable transmitters per node.

4. CONCLUSIONS

We have derived the performance of networks when only their nodal transceiver resources limit them. Such hypothetical, infinite bandwidth networks establish a lower bound on the blocking probability of any real network.

The coexistence of nodal and network bandwidth limitations was investigated for WDM rings without wavelength conversion. As the number of transceivers per node is taken to higher and higher values, our simulations have shown how the main source of blocking in the network shifts from the nodes to fiber plant. For any given blocking probability, there is an optimal number of transceivers per node that maximizes the traffic per transceiver.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by Ericsson Telecomunicações do Brasil, CAPES and CNPq.

REFERENCES

- [1] I. Chlamtac, A. Ganz, and G. Karmi, "Lightpath Communication: An approach to high bandwidth optical WAN's", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 40, no. 7, pp. 1171-1182, July 1992.
- [2] R.A. Barry and P.A. Humblet, "Models of blocking probability in all-optical networks with and without wavelength changers", in *Proc. IEEE INFOCOM'95*, pp. 402-412, Apr. 1995.
- [3] S. Subramaniam, M. Azizoglu, and K. Somani, "All-Optical Networks with Sparse Wavelength Conversion", *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 4, no. 4, pp. 544-557, Aug. 1996.
- [4] R. Ramaswami and K.N. Sivarajan, "Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks", *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol.3, pp. 489-500, Oct. 1995.
- [5] M. Kovacevic and A.S. Acampora, "On the Benefits of Wavelength Translation in all optical clear-channel networks", *IEEE JSAC/JLT Special Issue on Optical Networks*, vol. 14, no. 6, pp. 868-800, June 1996.
- [6] P.E. Green Jr., "Optical Networking Update", *IEEE J. Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 5, pp. 764-779, June 1996.