

2.

PROGRESSOS E DESAFIOS DAS REDES ÓPTICAS

Como visto anteriormente, as redes ópticas possuem características intrínsecas a de um serviço de excelência. De uma forma geral, podemos dizer que as redes ópticas devem apresentar as seguintes características:

- Ser uma rede essencialmente de alta capacidade;
- Ter uma estrutura modular e escalonável, significando que pode crescer com a agregação de várias subestruturas similares sem a necessidade de alteração de hardware;
- Ser reconfigurável, permitindo, assim, a recuperação de um grande número de falhas;
- Permitir a coexistência de diversos serviços em seus canais de transmissão.

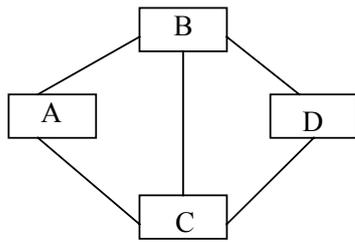
2.1

Características topológicas das redes

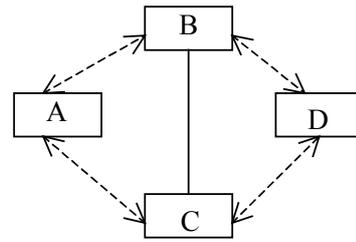
Inicialmente, deve-se diferenciar algumas características topológicas de uma mesma rede para que se possa distinguir os aspectos físicos e os lógicos. A figura 2.1 ilustra essas diferenças.

A partir da figura podemos observar que:

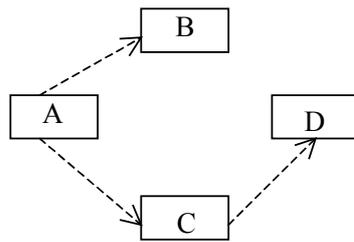
- A disposição dos nós e o modo com que os mesmos estão fisicamente conectados definem a topologia física da rede;
- As formas que os nós podem se comunicar entre si, esquecendo o projeto físico, constitui a topologia lógica da rede;
- Na topologia física, pode-se impor um caminho físico particular que define por onde o tráfego flui entre os diferentes nós. O problema de roteamento é basicamente a obtenção de um caminho físico ótimo para uma dada topologia física num dado momento.



(a) Topologia física



(b) Topologia lógica em uma transmissão broadcast



(c) Topologia virtual de um roteamento ótimo

Figura 2.1: Características topológicas de uma rede

Na figura 2.1, a topologia física da rede é composta de quatro nós, estando os enlaces físicos representados pelas linhas cheias (figura 2.1 (a)). Deseja-se, então, realizar uma transmissão do tipo broadcast, onde um sinal transmitido em um determinado nó é endereçado para todos os outros nós da rede. O nó A se comunicará com todos os demais – este é o caminho lógico e está representado pelas linhas pontilhadas (figura 2.1 (b)).

Baseado na topologia física existente na figura 2.1, os caminhos possíveis são A-B, A-C, A-B-C, A-C-B, A-B-D, A-C-D, A-B-C-D, A-C-B-D, A-B-D-C e A-C-D-B. Ao considerar-se as características da rede para a escolha da melhor rota neste exemplo, o tráfego será roteado pelos caminhos A-B, A-C, A-C-D, conforme representado pela linha tracejada (figura 2.1 (c)).

2.2

Classificação das redes ópticas

As redes ópticas podem ser classificadas segundo:

- Redes nas quais a conexão entre dois nós é executada por meio de um único canal empregando um único comprimento de onda (figura 2.2);
- Redes nas quais algumas conexões necessitam de conectores que convertam o canal de transmissão e, portanto, alterando o comprimento de onda (figura 2.3).

Além disso, as conexões também podem ser classificadas em unidirecionais e bidirecionais. Entende-se por conexões unidirecionais aquelas em que seus nós são classificados única e exclusivamente de transmissor e receptor, ou seja, o transmissor só transmite os sinais e o receptor só recebe. Já nas conexões bidirecionais, os nós tanto recebem quanto transmitem os sinais.

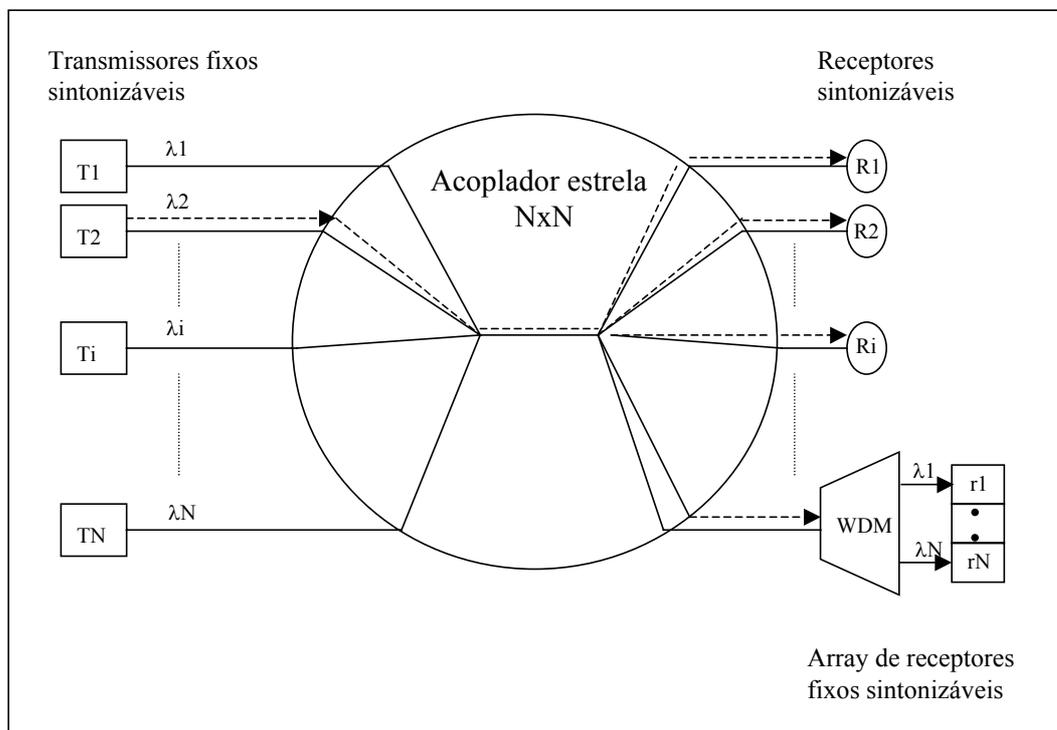


Figura 2.2: Rede estrela single hop do tipo broadcast and select

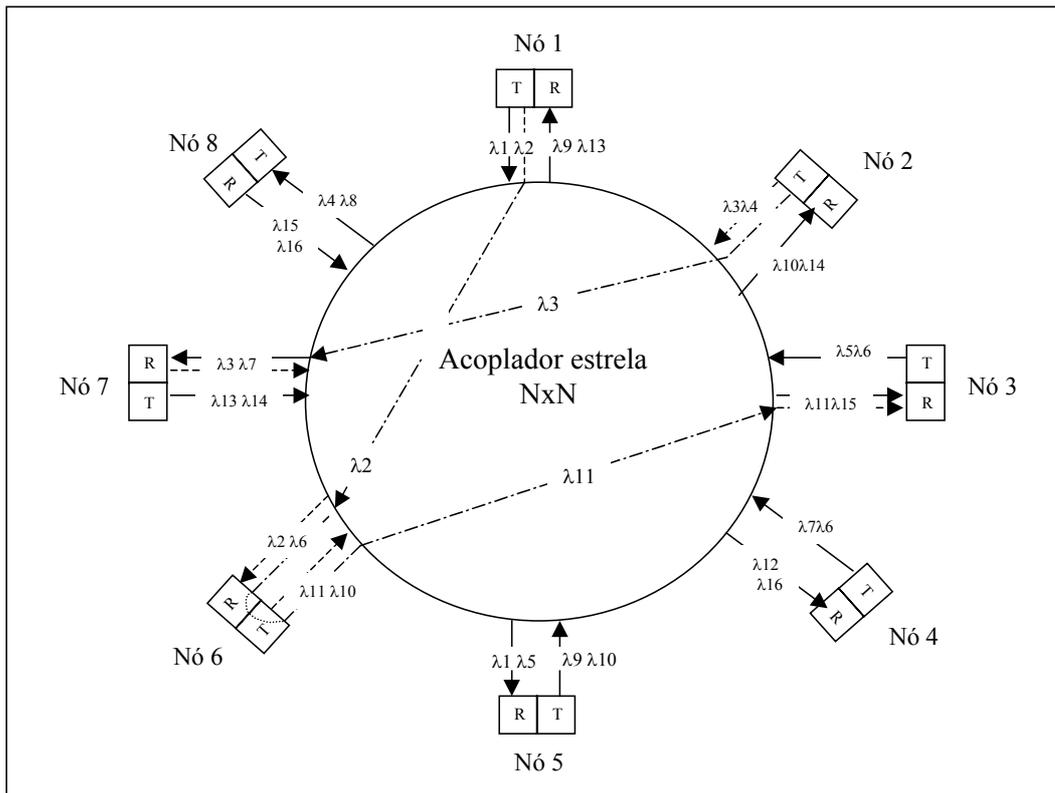


Figura 2.3: Exemplo de uma rede estrela WDM multihop com 8 nós

A figura 2.2 mostra uma rede classificada de enlace único (do inglês, *single hop*) - rede composta de um único enlace e a figura 2.3 representa uma rede de enlaces múltiplos (do inglês, *multihop*) - rede com múltiplos enlaces. Como já dito anteriormente, no primeiro desenho a transmissão e a recepção são feitas sem que haja troca / conversão de comprimento de onda. Os transmissores possuem comprimentos de onda pré definidos, assim como os receptores. A cada receptor será encaminhado um comprimento de onda fixo. Além disso, a figura 2.2 mostra o tipo de conexão unidirecional, ou seja, em uma única direção.

Já a figura 2.3 representa conexões bidirecionais, ou seja em duas direções, com conversão de comprimentos de onda ao longo da transmissão.

Redes single hop podem ser estruturadas de muitas maneiras, usando o meio comum através do qual todos os nós se comunicarão, ou usando dispositivos intermediários onde os comprimentos de onda são apropriadamente roteados. A primeira solução denomina-se broadcast and select e a segunda de roteamento no comprimento de onda.

Redes multihop, por sua vez, são caracterizadas por sua própria topologia virtual, ou seja, pela arquitetura de suas interconexões entre quaisquer pares de nós.

A classificação das redes em single hop e multihop é voltada para a topologia virtual da rede. De fato, várias topologias físicas podem suportar a mesma rede single hop ou a mesma rede multihop.

2.3 Representação das redes ópticas

Para que se entenda melhor o conceito de representação das redes ópticas, devemos ter em mente alguns importantes conceitos relativos a estas redes.

2.3.1 Representação por grafos

De um modo geral, redes podem tomar a forma de grafo nos quais as arestas orientadas representam os canais. Um grafo G consiste de um conjunto de vértices $V(G)$ e um conjunto de arestas $E(G)$, onde cada aresta une um par de vértices distintos (u,v) . Um grafo é considerado conexo se ele contém um caminho entre quaisquer pares de vértices, caso contrário ele é desconexo.

O número de vértices e de arestas em G são denominados, respectivamente, ordem e tamanho de G .

O diâmetro de um grafo é a maior distância entre dois pares de vértices e pode ser considerado como um importante parâmetro.

Outros parâmetros podem ser levados em consideração em um problema de roteamento de tráfego em redes de comutação, tais como custo de conversão e tempo de retardo. Todos os parâmetros podem ser analisados e a melhor rota para o tráfego de dados entre nós pode ser obtida através de algoritmos apropriados.

2.3.2 Redes multiníveis

Quando uma rede é usada para interconectar nós geograficamente agrupados e com uma relação mútua de tráfego, é adequado organizá-la como uma rede multinível. Por exemplo, pode-se ter um primeiro nível, ou nível de acesso, consistindo de várias redes single hop broadcast and select e um segundo chamado de backbone, que constitui um tipo de estrutura apropriada para longas distâncias. Uma arquitetura deste tipo pode ser facilmente iterada, levando a uma organização hierárquica, cuja gerência é feita através de um protocolo global. A figura 2.4 apresenta um exemplo da estrutura de uma rede multinível.

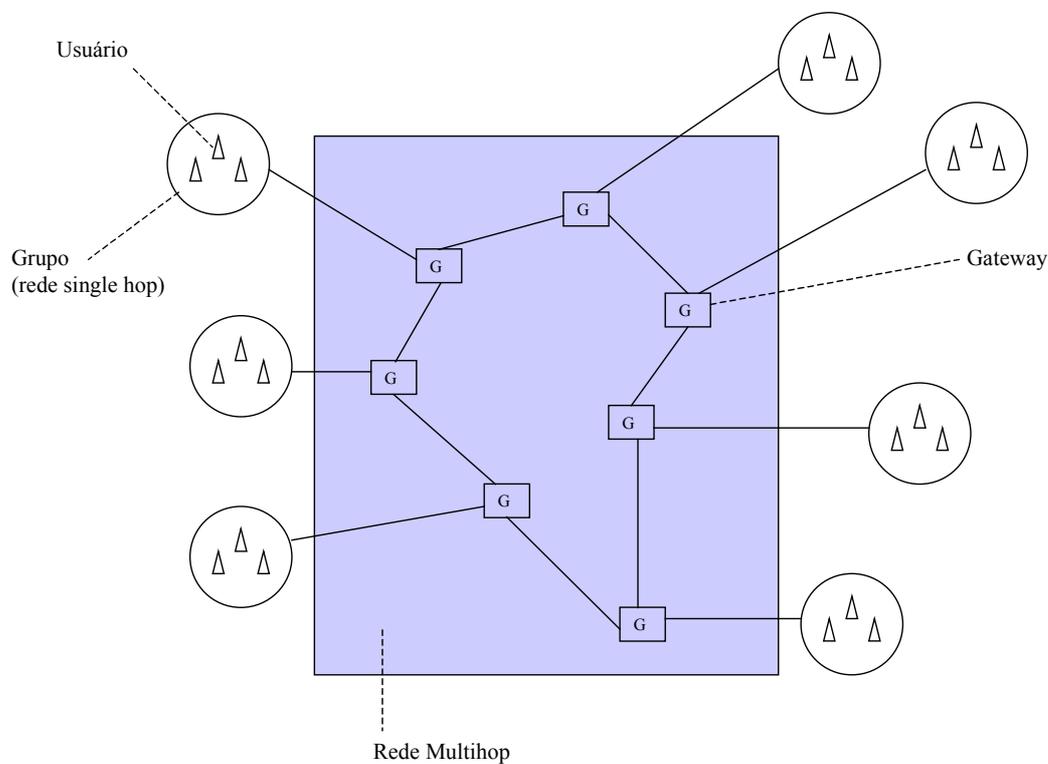


Figura 2.4: Representação esquemática de uma rede multinível

2.3.3 Reuso de comprimento de onda

Redes que apresentam o reuso de comprimentos de onda são aquelas nas quais um mesmo comprimento de onda pode ser espacialmente reusado – em caminhos que não compartilhem enlaces – transportando múltiplas conexões simultaneamente. Como exemplo na figura 2.5, o comprimento de onda λ_1 é usado para configurar o caminho do nó A ao nó C e em seguida do nó G ao nó H.

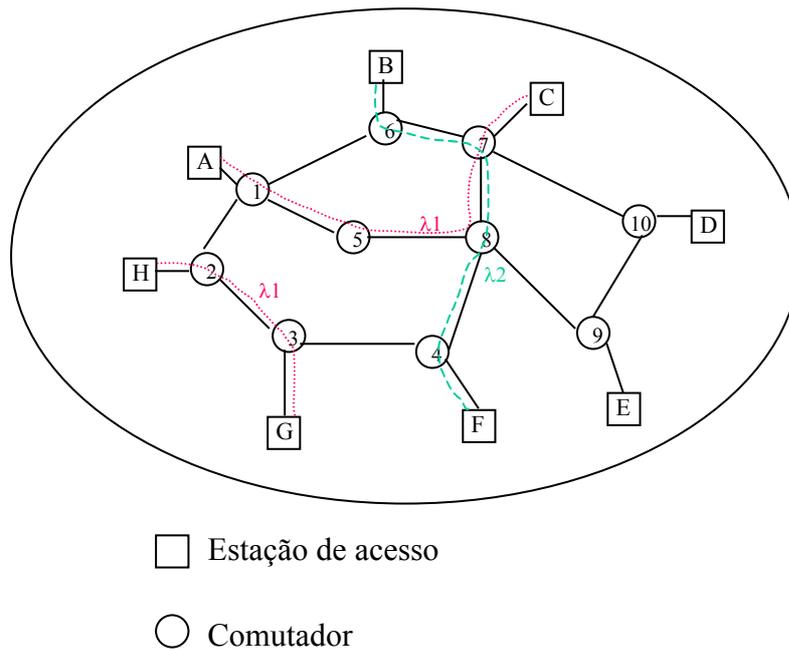


Figura 2.5: Roteamento de portadoras ópticas em uma WAN WDM

2.3.4 Conversão de comprimento de onda

Considere a figura 2.6. Ela mostra uma rede de roteamento no comprimento de onda contendo dois conectores cruzados WDM (S1 e S2) e cinco estações de acesso (de A a E). Para se estabelecer um caminho, necessita-se que um mesmo comprimento de onda seja alocado em todos os enlaces do percurso. Esta exigência é uma restrição da continuidade do comprimento de onda, o que distingue uma rede de roteamento de outra de comutação de circuitos.

Considere o exemplo da figura 2.7(a). Dois caminhos (representados pelas linhas cheias) foram estabelecidos na rede:

- Um entre o nó 1 e o nó 2 no comprimento de onda λ_1 ;

- Outro entre o nó 2 e o nó 3 no comprimento de onda λ_2 .

Suponha, agora, que um caminho entre o nó 1 e o nó 3 da mesma figura (figura 2.7) precise ser configurado. Estabelecer tal caminho é impossível mesmo que haja um comprimento de onda disponível em cada um dos enlaces entre o nó 1 e o nó 3. Isto se deve ao fato de que os comprimentos de onda disponíveis nos dois enlaces são diferentes.

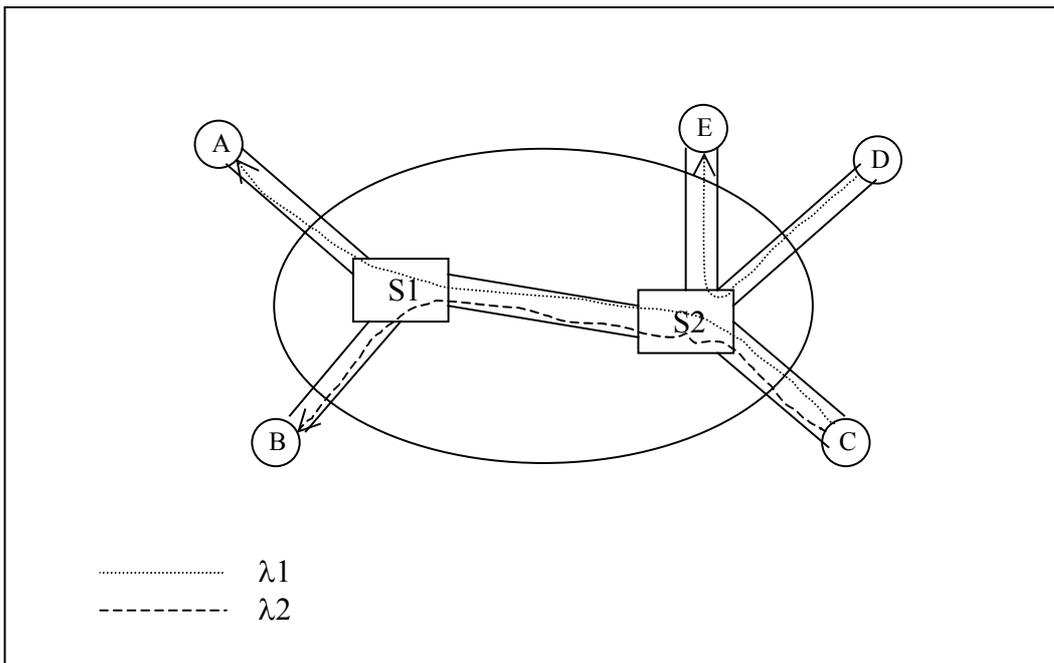
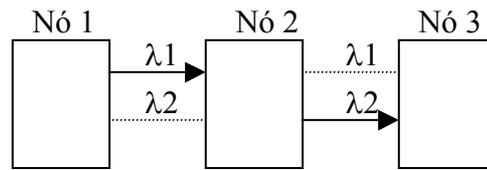
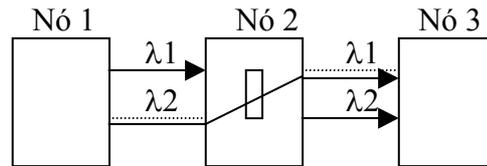


Figura 2.6: Rede de roteamento WDM inteiramente óptica

Se houvesse a habilidade de se converter os dados que chegam em um comprimento de onda para outro, em um outro nó intermediário, a restrição de continuidade estaria eliminada. Tal técnica é realizável e denomina-se de conversão de comprimento de onda. Na figura 2.7 (b), um conversor de comprimento de onda no nó 2 é empregado para converter os dados do comprimento de onda λ_1 para o λ_2 . O novo caminho entre o nó 1 e o nó 3 pode ser estabelecido usando o comprimento de onda λ_2 no enlace entre o nó 1 e o nó 2 e, então, usar o comprimento de onda λ_1 para chegar ao nó 3.



(a) Sem conversão



(b) Com conversão

Figura 2.7: Restrição da continuidade do comprimento de onda em uma rede de roteamento WDM

Observe que um único caminho em tais redes conversoras pode empregar diferentes comprimentos de onda ao longo dos enlaces do percurso. Desta forma, a conversão de comprimento de onda pode aumentar a eficiência das redes, solucionando conflitos.

2.4

Aspectos de tráfego

Em geral, em redes com um enlace ou com múltiplos enlaces vários caminhos podem interligar os nós, levando à topologia virtual desejada. Em princípio, em todas as topologias de rede é possível a transmissão de pacotes, desde que o nó origem e destino sejam definidos e que a continuidade da rota seja garantida. O melhor caminho para trafegar dados em uma determinada rota é escolhido a partir de um critério de qualidade.

O custo de transmissão de dados de um enlace não é definido univocamente. Pode-se identificar o custo de um enlace através de sua dimensão física, do retardo médio da transmissão, da probabilidade de perda de pacotes, de sua capacidade, etc. Contudo, uma vez que se escolha o parâmetro a otimizar, a

disponibilidade dos múltiplos percursos fim-a-fim é explorada de forma a encontrar a situação de melhor razão custo/ desempenho. De fato, se duas conexões alternativas podem ser empregadas, aquela caracterizada pelo menor custo cumulativo é escolhida. Esta escolha pode ser feita localmente, pelos nós através dos quais o pacote viaja, ou por um supervisor central que organiza a rede.

As técnicas de roteamento são em geral baseadas em algoritmos que calculam e selecionam o melhor caminho. Tais algoritmos são caracterizados pelas seguintes propriedades que, lamentavelmente, não são sempre compatíveis:

- Robustez: em relação ao mau funcionamento do nó ou enlace e à dinâmica das condições de tráfego;
- Estabilidade: em relação a variações, em curto período, dos parâmetros da rede;
- Equidade: para equalizar a distribuição do fluxo de pacotes e para manter a uniformidade da alocação de recursos;
- Otimização: para satisfazer as restrições, maximizar a eficiência da rede e minimizar seus custos.

Com base nos itens apresentados anteriormente, mostra-se a classificação de alguns esquemas de roteamento.

Primeiramente, pode-se agrupar as estratégias de roteamento em duas classes baseadas, respectivamente, em algoritmos de roteamento estático e de roteamento dinâmico ou adaptativo. Os algoritmos estáticos definem caminhos com base nas características da topologia virtual (número de nós), extensão da rede (comprimento físico do percurso) ou das condições de tráfego estimadas a priori (através do emprego de subalgoritmos de previsão).

Os algoritmos adaptativos, ao contrário, uma vez que monitoram as condições da rede constantemente, podem modificar as escolhas de roteamento de forma a seguirem a dinâmica do fluxo de tráfego. Há algoritmos concebidos das mais variadas formas, dependendo da estrutura do sistema de controle de fluxo.

Os algoritmos adaptativos podem estar centralizados em um centro de controle de roteamento onde todas as informações referentes à operabilidade da rede são coletadas, ou podem estar distribuídos ao longo dos nós nos quais esquemas de roteamento são acionados automaticamente. O caso limite desta classe consiste em algoritmos aleatórios ou quase-aleatórios nos quais o supervisor não controla a propagação dos pacotes.

Os algoritmos de roteamento também podem ser discriminados de acordo com seus objetivos. De fato, podem ser empregados para a gerência de ponto-a-ponto, ponto-multiponto ou comunicação do tipo broadcast. Em particular, no primeiro caso, quando se necessita conectar pares de usuários remotos, pode-se ter uma transmissão orientada à conexão, usando circuitos virtuais, ou não orientada à conexão, com datagrama.

2.5

Roteamento óptico nas redes de comunicação

Dependendo da natureza temporal da demanda dos caminhos de luz, pode-se classificar os pedidos de portadoras ópticas em duas categorias: *offline* e *online*. No caso *online*, as exigências por portadoras ópticas crescem com o tempo e, cada portadora deve prover uma demanda sem esperar que futuras exigências sejam conhecidas. Portadoras ópticas existentes não podem ser reroteadas para que se acomodem os novos caminhos.

No caso *offline*, são dados todos os conjuntos de portadoras ópticas que devem ser roteados. O caso *offline* é equivalente ao *online* com a liberdade adicional da possibilidade de roteamento dos caminhos existentes quando do surgimento de novas demandas. Como esperado, o projeto de redes para suportar portadoras ópticas *online* é bem mais complexo.

Existe uma outra dimensão para a natureza temporal das exigências por portadoras ópticas. A demanda pode ser por portadoras permanentes ou não permanentes. Observe que no caso da demanda *offline*, está implícito que estes caminhos são permanentes.

Uma outra importante questão é a possibilidade ou não de se bloquear alguns caminhos ou se a rede suporta todas as requisições de portadoras. Por exemplo, a rede de telefonia é projetada para suportar a maior parte dos pedidos de chamadas, mas alguns pedidos são bloqueados devido a capacidade insuficiente da rede. Na realidade, busca-se projetar a rede de forma a manter a probabilidade de bloqueio dentro de limites aceitáveis.

É impossível projetar uma rede de forma a atender demandas arbitrárias com fontes limitadas. Assim, assume-se algumas propriedades para as demandas de caminhos de luz que possam surgir. Agrupam-se essas propriedades e criam-se os modelos de tráfego. Os modelos de tráfego mais empregados em redes ópticas são a seguir apresentados.

2.5.1

Modelagem por matriz de tráfego fixa

Neste caso, o conjunto de portadoras ópticas a ser configurado é dado sob a forma de uma matriz de tráfego $T = (t(i,j))$, onde seu elemento $t(i,j)$ denota o número de comprimentos de onda a ser configurado entre os nós i e j . A demanda de tráfego é conhecida antecipadamente. Isto pode refletir uma situação onde a rede está sendo inicialmente provisionada, mas não reflete a situação onde portadoras ópticas são configuradas ou interrompidas durante a operação. Neste caso, o objetivo da otimização é minimizar o número de comprimentos de onda e/ou outro parâmetro/equipamento relacionado (por exemplo, número de comutadores ou conversores de comprimento de ondas) necessários para suportar o tráfego. Este modelo é *offline* e sem bloqueio.

2.5.2

Modelagem por permutações

Neste modelo de tráfego é permitido a cada par de nós ter, no máximo, uma portadora óptica entre eles e, é permitido a cada nó ser fonte ou destino de, no máximo, um caminho de luz. Então, quando todos os nós emitem ou absorvem exatamente um caminho de luz, o conjunto de portadoras ópticas de destino é a permutação do conjunto de caminhos de luz fonte. Este modelo é apropriado para

caracterizar o tráfego em um comutador $N \times N$ (N é o número de entradas/ saídas). A idéia por trás deste modelo é a da cobertura de uma grande variedade de estados de tráfego (observe que há $N!$ diferentes matrizes de tráfego possíveis). Não é um modelo realístico para se descrever a demanda de caminhos de luz, mas pode ser usado para chegar-se a algumas exigências fundamentais para parâmetros importantes, tais como o número de comprimentos de luz, comutadores e conversores de comprimentos de onda necessários à rede. Este modelo aplica-se tanto para os casos *online* quanto *offline* e a ambos os modelos – com e sem bloqueio. Assim, um modelo com bloqueio deve implicar que a rede esteja projetada para suportar a maioria das permutações, mas algumas portadoras em algumas permutações podem estar bloqueadas.

2.5.3

Modelagem por carga máxima

Aqui o tráfego é caracterizado por um parâmetro denominado carga. A carga é definida como o número máximo de portadoras ópticas concorrentes que podem se apresentar em qualquer enlace de rede. Este é um importante parâmetro, pois a carga que pode ser suportada será o número máximo de comprimentos de onda disponíveis no enlace. A carga é também uma medida de utilização dos enlaces. Se a carga que pode ser suportada é pequena, quando comparada ao número de comprimentos de onda, a rede não está sendo utilizada eficientemente.

Este é um típico modelo sem bloqueio. Objetiva-se maximizar a carga que pode ser suportada, dado um número de comprimentos de onda, assim como o número e a alocação dos conversores e comutadores de comprimentos de onda disponíveis. Equivalentemente, pode-se buscar minimizar o número de comprimentos de onda necessários para suportar uma dada carga.

Este modelo aplica-se tanto para os casos *online* quanto para casos *offline*. Contudo, assume-se que o roteamento das portadoras ópticas já está especificado – caso contrário, seria inviável determinar a carga. A vantagem deste modelo é que não necessita de muito conhecimento sobre a demanda de tráfego, provendo não só uma medida de eficiência da rede, assim como das facilidades disponíveis

ou seja, a quantidade de facilidades necessárias para obter-se uma certa utilização da rede.

2.5.4 Modelagem estatística

No modelo estatístico, tem-se algum conhecimento dos aspectos estatísticos dos pedidos de estabelecimento e conexão dos caminhos de luz. Por exemplo, pode-se assumir que o pedido de portadoras ópticas em cada nó possui a forma de processo de Poisson com uma taxa conhecida e, que o tempo de espera possui uma distribuição exponencial com uma média conhecida. Este tipo de modelo estatístico por demanda tem sido usado desde o início do século em redes de telefonia. Para as redes ópticas, é ainda muito cedo para se prever a estatística dos caminhos da luz, o que limita a validade deste modelo. Esta é freqüentemente uma modelagem com bloqueio e *online*.

Quando se considera o modelo sem bloqueio para a demanda, costuma-se projetar a rede de forma que atenda a todas as demandas possíveis. Isto é apropriado para o modelo de tráfego fixo considerado anteriormente, mas não necessariamente apropriado para outros modelos. Além disso, como apontado anteriormente, um super dimensionamento da rede ocorrerá, se todas as possíveis permutações, ou todas as possíveis demandas de tráfego com uma certa carga, deverem ser suportadas sem bloqueio. Apesar da maior parte deste imenso conjunto de demandas de tráfego possíveis ser bem comportado, eles necessitam apenas de facilidades moderadas da rede. Poucos casos patológicos podem necessitar de uma grande quantidade de recursos se forem para ser suportados sem bloqueio.

A probabilidade de bloqueio é simplesmente o número de pedidos que são bloqueados em um longo período de tempo dividido pelo número total de pedidos naquele tempo. Melhor do que projetar a rede para alcançar uma determinada probabilidade de bloqueio, é projetá-la para maximizar o tempo antes de ocorrer o primeiro bloqueio. Em termos estatísticos, este é chamado de tempo de passagem. Este pode ser uma medida apropriada, pois é o tempo em que o operador deve adicionar mais capacidade à rede. Infelizmente, computar o tempo de passagem

não é uma tarefa fácil e, por enquanto, permanece-se entre o pior caso do modelo sem bloqueio e o modelo que emprega probabilidade de bloqueio como desempenho de medida.

2.6

Tipos de roteamento de comprimento de onda

Existem dois tipos de redes de roteamento de comprimento de onda, a estática e a reconfigurável. Ambas as redes suportam caminhos de luz entre os seus usuários. Uma rede estática não emprega conversores em seus nós. Pode se empregar conversores de onda fixo ou estáticos, mas não conversores dinâmicos. Nenhuma rota definida pode trocar de comprimento de onda durante toda a transmissão entre o nó origem e o nó destino. Redes configuráveis, por outro lado, empregam comutadores (ópticos ou eletrônicos) dentro dos nós de conexão e/ou conversores dinâmicos. Observe que as redes com comutadores e conversores estáticos são consideradas redes estáticas, assim como as redes sem comutadores, mas com conversores de comprimentos de onda, são consideradas redes dinâmicas ou reconfiguráveis.

A principal diferença entre os dois tipos de redes de roteamento de comprimentos de onda é que o conjunto de portadoras ópticas que pode ser estabelecido entre os usuários é fixo em uma rede estática, enquanto que pode mudar, pela alteração de estados de comutação ou de conversão de comprimentos de onda nos nós de conexão cruzada, nas redes reconfiguráveis.

Espera-se que uma rede estática seja mais econômica e de maior confiabilidade do que uma rede reconfigurável, uma vez que pode ser construída inteiramente com componentes passivos.

Contudo, um sinal entrando em alguma porta da rede em algum comprimento de onda será sempre roteado para uma das portas de saída específicas em um comprimento de onda específico ou em vários especificados para este sinal de entrada. As portas e os comprimentos de onda são determinados quando da construção da rede. Define-se para cada usuário a rota que ele vai utilizar dentre

as rotas disponíveis de uma rede para trafegar seus dados, assim como o comprimento de onda que será utilizado por esse usuário nesta rota definida.

Como observado, o projeto de uma rede estática é apropriado desde que haja dado um conjunto fixo de pedidos para as portadoras ópticas que a rede tem que suportar a priori. Contudo, na maioria das redes, o conjunto de portadoras, além de não ser conhecido a priori também se modifica ao longo do tempo.

2.7 RWA – Routing and Wavelength Assignment

Usuários finais de uma rede, cuja rede central (backbone) é suportada pela tecnologia WDM, comunicam-se com outros usuários através de canais ópticos denominados de portadoras ópticas. Um caminho de luz pode abranger vários enlaces de fibra. Cada nó intermediário no caminho de luz fornece ou supre a rede com uma certa facilidade [16].

Se uma rede tiver N nós, cada um munido de $N-1$ transceptores (lasers /filtros), e se existir um número de comprimentos de onda igual ao número de enlaces, então, cada par de nó será conectado por um caminho inteiramente óptico, não havendo nenhum problema a ser resolvido [17 - 18].

Contudo, observa-se que:

- O tamanho da rede (N) deve ser escalonável;
- Transceptores são componentes caros;
- Limitações tecnológicas ditam a existência de uma número máximo W de canais.

Desta forma, apenas número limitado de caminhos de luz pode ser estabelecido simultaneamente na rede.

O problema consiste então em dado um certo conjunto de caminhos de luz que precisam ser estabelecidos e uma limitação do número de comprimentos de onda,

determinar-se as rotas pelas quais estes caminhos devem ser configurados e os comprimentos de onda atribuídos, de forma a otimizar alguma ou algumas variáveis pré-definidas[19].

Normalmente um caminho de luz opera em um mesmo comprimento de onda por todos os enlaces que ele atravessa, mas se dois caminhos compartilham um enlace em comum, não se deve atribuir o mesmo comprimento de onda aos mesmos. Contudo, pode-se dispor de nós intermediários que possuem a facilidade de conversão de comprimentos de onda. Desta forma, um caminho de luz pode ser comutado entre diferentes comprimentos de onda no percurso entre o nó origem e o nó destino [20].

Dependendo das características físicas das fibras, do comprimento do enlace e da topologia da rede, os dados de uma rota podem trafegar em um único comprimento de onda ao longo de todo do percurso traçado para essa rota entre o nó origem e o nó destino, ou através de vários comprimentos de onda. A determinação dos comprimentos de onda e do percurso que será utilizado em cada uma das rotas é chamado de RWA (*Routing Wavelength Assignment*), ou seja, roteamento e alocação de comprimentos de onda. A solução de encontrar a melhor rota com ou sem conversão de comprimentos de onda obedece a um ou mais critérios previamente estabelecidos. O principal objetivo deste trabalho é a determinação de rotas e alocação de comprimentos de onda para as solicitações, que impliquem em um custo total mínimo.

A solução para esses problemas é feita através de alguns algoritmos. Esses algoritmos foram estudados para atenderem a qualquer tipo de rede. Ilustram-se as diferenças entre os diferentes modelos de redes na figura 2.8. No desenho abaixo, não há conversores de onda disponíveis. Mais tarde discutiremos a conversão de comprimentos de onda.

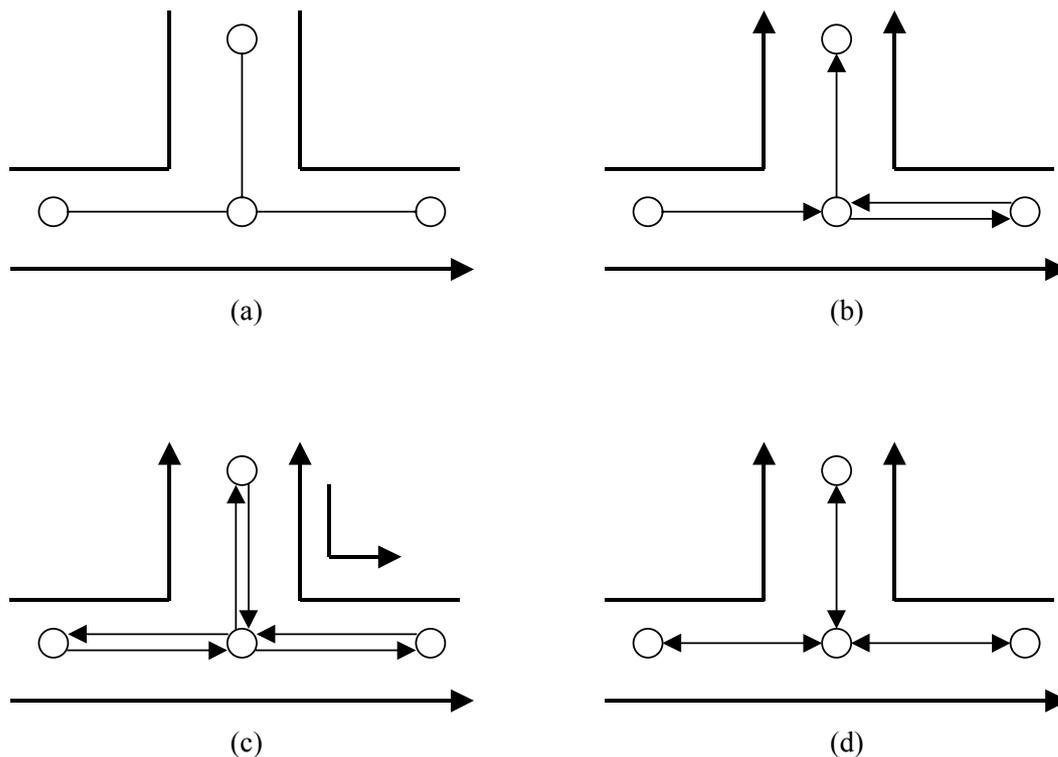


Figura 2.8: Diferentes modelos de rede correspondendo a arestas e caminhos de luz direcionais ou não

Na figura 2.8(a) tem-se uma rede com arestas não direcionais que deve suportar três caminhos de luz. Observe que como os enlaces não são direcionais, cada um dos trechos necessita de um comprimento de onda diferente, para que não haja coincidência dos mesmos em um determinado enlace. Portanto, são necessários três comprimentos de onda para suportar esse conjunto.

Agora observe a rede com arestas direcionadas e caminhos de luz direcionados mostrada na figura 2.8(b). Apenas dois comprimentos de onda são necessários, já que somente um trecho possui dois enlaces coincidentes, ou seja, utilizam a mesma rota física, uma entrando no nó da esquerda e o outro saindo do nó da esquerda. Desta forma, neste trecho diferentes comprimentos de onda devem ser utilizados. Nos outros trechos o mesmo comprimento de onda pode ser utilizado.

As figuras 2.8 (c) e (d) mostram dois casos, ambos com arestas não direcionais e caminhos de luz direcionais. Na figura 2.8 (c), representa-se a aresta não direcional por dois enlaces unidirecionais. Isto corresponde a se ter uma fibra em cada direção na rede real e se ter alguns comprimentos de onda ociosos em cada

fibra. Neste caso, observa-se que apenas dois comprimentos de onda são necessários para suportar o tráfego.

O último caso é a figura 2.8 (d), onde se representa a aresta não direcional por um enlace bidirecional. Isto corresponde a se ter uma única fibra na qual a transmissão ocorre em ambas as direções. Existe um número total fixo de comprimentos de onda; alguns são transmitidos em uma direção, e os remanescentes na direção oposta. Pode-se assumir que esta atribuição pode ser feita de maneira flexível, conforme requerido pelo tráfego. Neste caso, a restrição de atribuição de comprimento de onda é um pouco diferente. Se um comprimento de onda é usado em uma direção do enlace, não poderá ser usado em outra direção. Observe que, neste caso, a direção do caminho de luz não afeta a atribuição do comprimento de luz.

Na prática, sistemas bidirecionais possuem comprimentos de onda fixos em cada direção, o que implica em uma restrição importante.

Em alguns casos, o roteamento já é dado e, assim, apenas se está preocupado com o problema da atribuição do comprimento de onda. A atribuição de comprimentos de onda para uma rede com caminhos de luz e arestas não direcionais deve obedecer as seguintes restrições:

- A duas portadoras ópticas não deve ser atribuído um mesmo comprimento de onda num dado enlace;
- Se há conversão de comprimento de onda, mas essa conversão não está disponível, a um caminho de luz deve ser atribuído o mesmo comprimento de onda em todos os enlaces em que for roteado.

Considere a rede apresentada na figura 2.9. O conjunto de requisições por portadoras também é mostrado nesta figura. O transmissor t_i deve estar conectado ao receptor r_{n-i+1} , onde n é o número de transmissores ou de receptores.

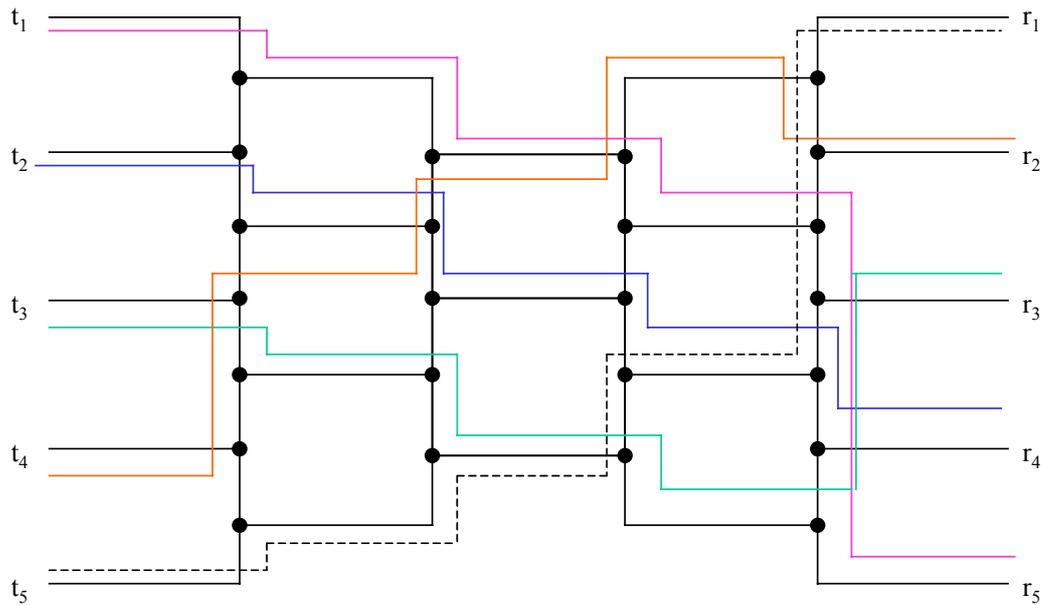


Figura 2.9: Exemplo para ilustrar a diferença entre o uso ou não dos conversores de comprimento de onda

Em cada nó existe um roteador que pode selecionar qualquer comprimento de onda para o tráfego das portadoras ópticas. Interessantemente, contudo, independente de como seja roteado as portadoras ópticas, quaisquer dois caminhos de luz pertencentes ao conjunto de requisições devem compartilhar um enlace comum. Portanto, a cada caminho de luz devem ser atribuídos comprimentos de onda diferentes, necessitando um total de n comprimentos de onda para satisfazer este conjunto de requisições.

Se houver um roteamento inteligente destas portadoras, pode-se rearranjar de maneira que no máximo dois caminhos de luz usem um certo enlace, como mostrado na figura 2.9. Isto significa que a carga é 2 e, portanto, dois comprimentos de onda são suficientes para satisfazer este conjunto de requisições se a conversão de comprimento de onda estiver disponível em cada nó da rede.

2.7.1

O caso das redes com múltiplos enlaces

A aplicabilidade ou não da conversão de comprimento de onda está intimamente relacionado ao fato do reuso, ou seja, ao reaproveitamento de comprimentos de onda e ao número de nós da rede [21].

Um fator mais conveniente de medida é o reuso de comprimento de onda, R , que é definido como carga oferecida por comprimento de onda na rede. Evidentemente, R depende de uma série de fatores, como:

- i) da topologia da rede;
- ii) da distribuição do tráfego na rede;
- iii) do algoritmo de roteamento de comprimento de onda (RWA) empregado;
- iv) do número de comprimento de onda disponíveis.

É possível calcular o valor máximo de R quando o número de comprimentos de onda é grande para pequenas redes. Quando o número de comprimentos de onda é pequeno, técnicas de simulação podem ser empregadas para computar o fator reuso.

A figura 2.10 abaixo, mostra um gráfico do fator de reuso contra o número de comprimentos de onda para uma rede de 32 nós de um grafo aleatório com grau médio por nó de 4. O fator de reuso é significativamente elevado no caso do emprego de conversão. Contudo, o fato interessante é que o fator de reuso aumenta a medida que o número de comprimentos de onda aumenta [22].

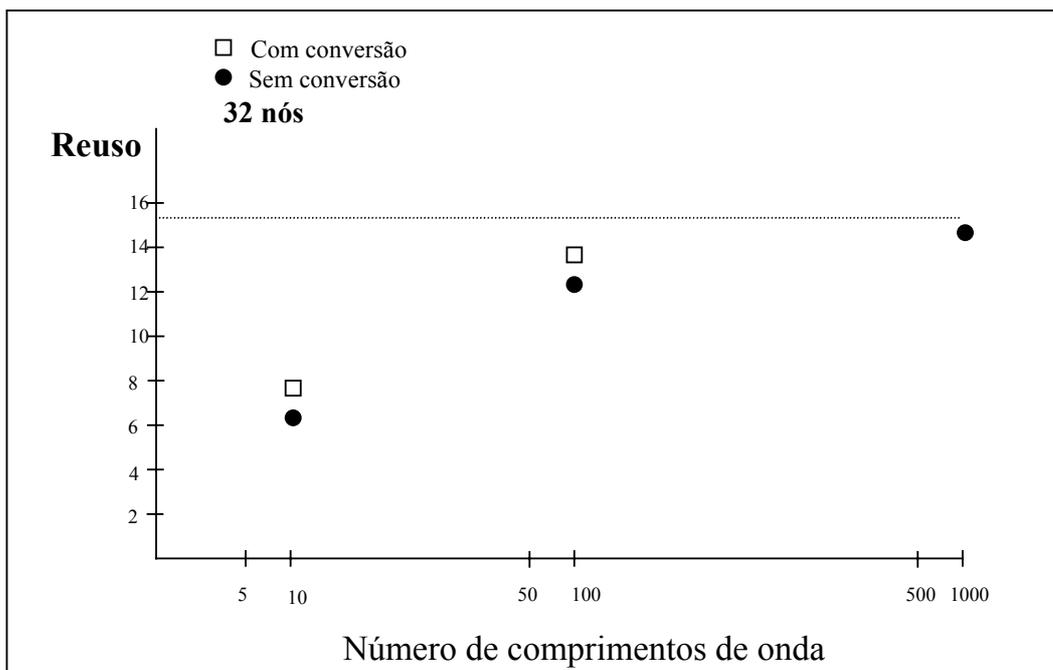


Figura 2.10: Fator de reuso

A linha horizontal da figura 2.10 mostra o fator de reuso assintótico que pode ser atingido com um número infinito de comprimentos de onda com conversão de comprimento de onda [23].

A figura 2.11 mostra um gráfico do fator de reuso contra o número de nós n . O valor de reuso para cada nó n é obtido pela média de três simulações em grafos aleatórios, cada um de grau médio 4. A figura mostra que [11]:

- i) R cresce com n ;
- ii) A diferença entre existência ou não de conversão também cresce com n .

Observe que i) é esperado devido ao comprimento do caminho de luz (em número de enlace) na rede que cresce com $\log n$, portanto, o número de enlaces cresce com n . Assim, esperar-se-ia que o fator de reuso crescesse bruscamente com o $n/ \log n$. A razão porque ii) cresce é porque o comprimento médio do caminho (ou enlaces) para um caminho de luz na rede cresce com n [11].

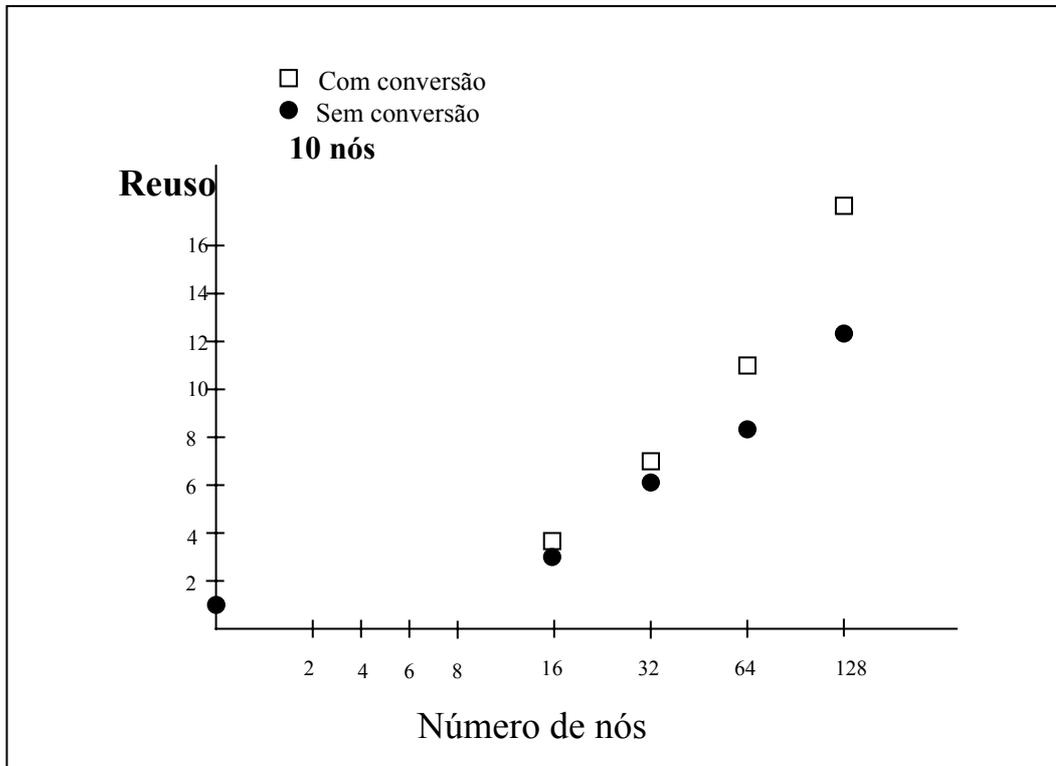


Figura 2.11: Fator de reuso para um determinado número de comprimentos de onda

2.7.2

Atribuição de comprimentos de onda e rotas alternativas

No problema RWA apresentado, usando o modelo estatístico para o tráfego, assumiu-se uma rota fixa entre os pares fonte-destino. Contudo, alguns outros modelos são também possíveis.

Idealmente, desejar-se-ia ter mais rotas alternativas para longas rotas do que para as mais curtas. Isto ajudaria a reduzir a probabilidade de bloqueio nas mais longas e, garantiria mais equidade de maneira geral. Por outro lado, rotas mais curtas tendem a ter uma menor probabilidade de bloqueio.

Paralelamente à escolha de rotas, a atribuição de comprimento de ondas também possui um importante papel na determinação do fator de reuso. Observe que, para o mesmo número de caminhos disponíveis, escolhendo-se o comprimento de onda mais usado em um caminho mais curto fixo entre dois nós a um comprimento de onda aleatório, a probabilidade de se determinar o mesmo comprimento de onda livre em todos os enlaces ao longo de uma rota particular é maior. A desvantagem é que se necessita do conhecimento dos comprimentos usados por todas as outras conexões na rede.