Desempenho do Roteamento Adaptativo-Alternativo em Redes Ópticas Dinâmicas

Paulo Ribeiro L. Júnior[1], Michael Taynnan[2], Marcelo S. Alencar[1]

[1]Departamento de Engenharia Elétrica (DEE)
Instituto de Estudos Avançados em Comunicações (Iecom)
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)
Campina Grande, PB – Brazil

[2]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB)
Campus Campina Grande
Campina Grande, PB – Brazil

{paulo,malencar}@iecom.org.br, {michael.taob}@gmail.com

Abstract. *In this article, four routing approaches are compared from the point of view of blocking probability for two scenarios: first varying the offered load and then varying the number of wavelengths. The scenarios give a more complete picture of the performance of these routing approaches and may help decide which to use based on the routing topology and traffic characteristics. Among the possible benefits of choosing the correct routing approach to be used to highlight the expected decrease in the number of wavelengths to maintain a given number of blocks in the network.*

Resumo. *Nesse artigo, são comparadas quatro abordagens de roteamento do ponto de vista da probabilidade de bloqueio em dois cenários: variando-se a carga oferecida e variando o número de comprimentos de onda. Os cenários dão uma visão mais geral do desempenho dessas abordagens de roteamento que pode auxiliar na decisão de qual roteamento usar a partir das características de topologia e tráfego. Dentre os possíveis benefícios de uma escolha correta da abordagem de roteamento a ser utilizada se destaca a esperada diminuição no número de comprimentos de onda para se manter um dado número de bloqueios na rede.*

1. Introdução

A popularização da Internet e dos serviços a ela correlacionados propiciou aumento na de qualidade de serviço sobre a infra-estrutura das redes de comunicações, que está diretamente ligada a fatores como baixo atraso na transmissão, alta largura de banda disponível, alta disponibilidade e baixa taxa de interrupção de transmissão. As redes ópticas multiplexadas por divisão em comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*), devido, principalmente, às suas características físicas, tÊsm ganhado cada vez mais aceitação como meio de transporte promissor para o tráfego da Internet e de outras fontes que nescessitam dessas características de qualidade.

Os usuários dessas redes se comunicam por conexões ópticas fim-a-fim, denominadas caminhos ópticos (*lightpaths*), desde um nó origem até um nó destino em uma rede

óptica e que utilizam, na ausência de conversão de comprimento de onda, o mesmo comprimento de onda disponível em todos os enlaces que compõem o caminho entre esses nós.

O problema de estabelecer conexões em uma rede óptica envolve o uso de algoritmos de roteamento e alocação de comprimento de onda (RWA – *Routing and Wavelength Assignment*). Tipicamente, um caminho óptico era caracterizado pelo conjunto "rota mais comprimento de onda"; entretanto, em uma visão multi-cliente, caminhos ópticos na rede totalmente óptica podem possuir características diferentes dependendo da aplicação ou da rede cliente que os está solicitando [Fonseca 2005] [Ramaswami and Sivarajan 2002]. Sendo assim, além de uma rota e de um comprimento de onda, para sua melhor caracterização, é necessário que um caminho óptico possua também atributos de qualidade de serviço óptico associados à sua criação no contexto de rede totalmente óptica.

Nesse artigo são comparadas quatro abordagens de roteamento do ponto de vista da probabilidade de bloqueio. Essa comparação é feita variando o número de comprimentos de onda disponíveis em cada fibra óptica mas com um valor fixo de carga oferecida na rede e, depois, variando a carga oferecida na rede e mantendo fixo o número de comprimentos de onda.

Esses dois cenários dão uma visão mais completa do desempenho dessas abordagens de roteamento, gerando resultados que podem ajudar o operador e o projetista da rede a decidir que roteamento usar a partir das características de topologia e tráfego. Dentre os possíveis benefícios de uma escolha correta da abordagem de roteamento a ser utilizada se destaca a esperada diminuição no número de comprimentos de onda para se manter um dado número de bloqueios na rede. Tal característica se traduz em sistemas com menor custo de instalação e manutenção da rede. Por outro lado, se garante que a extensibilidade da rede projetada praticamente não será afetada, pois há a capacidade de se suportar um volume maior de tráfego.

O restante do artigo se apresenta da seguinte forma: na Seção 2 é apresentada uma visão geral das redes roteadas a comprimento de onda. Nessa seção também o problema do RWA é definido; na Seção 3 são apresentadas as abordagens clássicas para roteamento bem como uma visão do estado da arte referente ao tema discutido. Também é apresentado o algoritmo de roteamento adaptativo-alternativo; na Seção 4 são discutidos o ambiente de simulação e os resultados obtidos dos experimentos e, na Seção 5, são apresentadas as conclusões do trabalho.

2. Redes ópticas roteadas a comprimento de onda

Uma característica intrínseca e única das redes WDM roteadas a comprimento de onda é a estreita ligação entre o estabelecimento de rotas e a atribuição de comprimentos de onda. Como visto na Figura 1, o estabelecimento de um caminho óptico é implementado pela seleção de uma rota, composta de enlaces físicos, entre um nó origem e um nó destino e a alocação de um comprimento de onda específico para a conexão [Rouskas and Perros 2002]. O problema de prover caminhos ópticos a uma rede óptica é chamado de problema de Roteamento e Alocação de Comprimento de Onda ou simplesmente RWA [Zang et al. 2000] e é mais complexo do que o problema de roteamento em redes eletrônicas. A complexidade adicional surge pelo fato do estabelecimento de um caminho óptico estar sujeito a uma restrição, conhecida como restrição de

comprimento de onda, que estabelece que, na ausência de conversores de comprimento de onda, o caminho óptico precisa ocupar o mesmo comprimento de onda em todos os enlaces entre um nó origem e um nó destino da rede [Ramaswami and Sivarajan 2002]. Um exemplo dessa característica é ilustrada na Figura 1, na qual dois caminhos ópticos são estabelecidos contendo enlaces em comum nas suas rotas e, por conta disso, dois comprimentos de onda são necessários.

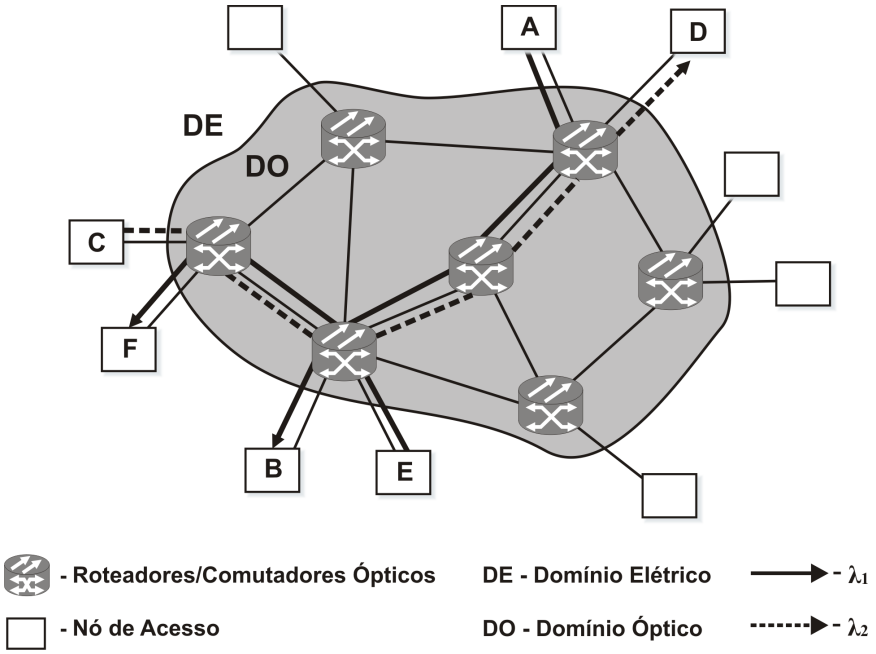

Figura 1. Representação de uma rede óptica transparente ilustrando a formação do domínio de transparência.

O problema pode ser apresentado da seguinte forma. Considere uma rede com K enlaces e W comprimentos de onda. O estado do i-ésimo enlace, $1 \leqslant i \leqslant K$, no instante de tempo t pode ser especificado pelo vetor coluna

$$\sigma_t^{(i)} = \begin{bmatrix} \sigma_t^{(i)}(1) \\ \sigma_t^{(i)}(2) \\ \vdots \\ \sigma_t^{(i)}(W) \end{bmatrix}, \tag{1}$$

em que, $\forall\, j$ tal que $1 \leqslant j \leqslant W$, $\sigma_t^{(i)}(j) = 1$ se o comprimento de onda j é usado por um caminho óptico no instante de tempo t, no enlace i e $\sigma_t^{(i)}(j) = 0$ se este comprimento de onda estiver disponível. Assim sendo, o estado da rede é descrito pela matriz

$$\sigma_t = \begin{bmatrix} \sigma_t^{(1)}(1) & \sigma_t^{(2)}(1) & \cdots & \sigma_t^{(K)}(1) \\ \sigma_t^{(1)}(2) & \sigma_t^{(2)}(2) & \cdots & \sigma_t^{(K)}(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_t^{(1)}(W) & \sigma_t^{(2)}(W) & \cdots & \sigma_t^{(K)}(W) \end{bmatrix}. \tag{2}$$

Dada uma requisição para o estabelecimento de conexão óptica no instante de tempo t entre os nós origem e destino, a função do algoritmo de RWA é selecionar um caminho E, composto pelos enlaces $(e_1, e_2, \ldots, e_n)$, tal que $\sigma_t^{(e_l)}(j) = 0$ para todo $l = 1, 2, \ldots, n$. Tal consideração satisfaz a restrição de continuidade de comprimento de onda.

O problema do RWA pode se apresentar de diferentes formas. As diferentes variantes, entretanto, podem ser genericamente classificadas de duas formas: um RWA estático, chamado de estabelecimento estático de caminho óptico (SLE – *Static Ligthpath Establishment*), segundo o qual as requisições de tráfego são conhecidas *a priori* e as rotas e respectivas alocações de comprimentos de onda são estabelecidas antes da sinalização entre os nós componentes das rotas e um RWA dinâmico, chamado de estabelecimento dinâmico de caminho óptico (DLE – *Dynamic Ligthpath Establishment*), em que as requisições são estabelecidas no momento em que são solicitadas, de acordo com o estado atual da rede. Neste trabalho, considera-se apenas o estabelecimento dinâmico de caminhos ópticos.

Na operação dinâmica de uma rede, os nós submetem requisições ao plano de controle para o estabelecimento de caminhos ópticos de acordo com suas necessidades. Dependendo do estado da rede no momento da requisição, a disponibilidade de recursos pode ou não ser suficiente para o estabelecimento de um caminho óptico no par de nós origem e destino correspondente. O estado da rede consiste da informação acerca de todas as rotas físicas e comprimentos de onda utilizados pelos caminhos ópticos ativos e muda de maneira aleatória à medida que novos caminhos ópticos vão se tornando ativos ou inativos na rede. Dessa forma, cada vez que uma requisição é feita, um algoritmo precisa ser executado em tempo real para determinar se é possível estabelecer um caminho óptico para ela. Se a requisição para um caminho óptico não for aceita devido à falta de recursos, então ela será bloqueada.

Por serem executados em tempo real, algoritmos de RWA em ambiente de tráfego dinâmico precisam ser simples. Tendo em vista que tratar os problemas de roteamento e alocação de comprimento de onda de forma unificada é oneroso do ponto de vista computacional, uma abordagem típica para se desenvolver algoritmos eficientes é desacoplar o problema em dois sub-problemas: o problema do roteamento e o problema da alocação de comprimento de onda e tratá-los de forma independente [Zang et al. 2000]. Dessa forma, a maioria dos algoritmos de RWA dinâmicos para redes roteadas a comprimentos de onda consistem dos seguintes passos gerais:

- **1º Passo –** Escolher os enlaces físicos que comporão a rota para cada par de nós origem e destino, de acordo com alguma métrica estabelecida, podendo-se criar listas que enumerem as rotas desde a melhor até a pior;
- **2º Passo –** Ordenar os comprimentos de onda em uma lista de acordo com alguma métrica particular;
- **3º Passo –** Selecionar a melhor rota e o melhor comprimento de onda, de forma a tentar estabelecer o melhor caminho óptico possível.

A natureza específica de um algoritmo de RWA dinâmico é determinada pelo número de rotas candidatas e pela forma como elas são selecionadas a partir de uma lista de possibilidades, a ordem com que os comprimentos de onda são listados e a forma como

essas listas de rotas e comprimentos de onda são acessadas para se compor o caminho óptico requerido por uma rede cliente.

3. Roteamento

Se um algoritmo estático é usado no cálculo para a seleção das melhores rotas, estas são estabelecidas e ordenadas de forma descorrelacionada do estado da rede. Já se um algoritmo adaptativo é utilizado para tal fim, os rotas que comporão os possíveis caminhos ópticos bem como seu ordenamento podem variar dependendo do estado atual da rede. Um algoritmo estático é executado *off-line*, ou melhor, anteriormente ao processo de sinalização entre os nós para o estabelecimento do caminho e as rotas calculadas são ordenadas e armazenadas para um uso posterior, que leva à uma baixa latência na rede durante o estabelecimento do caminho óptico. Algoritmos adaptativos, por sua vez, são executados no momento em que é feita uma requisição por um caminho óptico e que os nós sinalizam para sua obtenção. Por esse motivo, é dito que eles são executados *on-line*.

3.1. Abordagens clássicas de roteamento

Tipicamente, de acordo com [Zang et al. 2000], três tipos de algoritmos de roteamento são utilizados em redes ópticas roteadas a comprimentos de onda:

- **Fixo –** Este método é a forma mais direta de seleção de rotas, pois configura uma rota permanente ou semi-permanente entre o par de nós origem e destino, selecionada por algum algoritmo que calcula o caminho de melhor custo entre dois pontos de um grafo (como o algoritmo de Dijkstra ou de Bellman-Ford, por exemplo). Esse tipo de algoritmo de roteamento tem como principal vantagem sua simplicidade. Entretanto, devido a uma grande sensibilidade à falhas na rede, se por algum motivo algum dos recursos reservados para o estabelecimento do caminho óptico sobre a rota pré-determinada estiver indisponível, a probabilidade de bloqueio de rede pode se tornar considerável, tanto para casos estáticos quanto para dinâmicos [Zang et al. 2000];
- **Alternativo –** Neste método considera-se a seleção de rotas alternativas à rota mais curta. Quando uma conexão é requisitada, o nó fonte tenta estabelecer uma conexão com o nó destino por meio de cada rota usando a tabela de roteamento, começando sempre pela rota de melhor custo. Caso a primeira não esteja disponível, a segunda rota de melhor custo é então utilizada e assim por diante até conseguir uma rota. Caso não seja encontrado um caminho disponível, a requisição é perdida. [Mukherjee 2006].
- **Adaptativo –** No roteamento adaptativo, a rota de um nó fonte a um nó destino é escolhida dinamicamente, dependendo do estado da rede, comumente relacionado com o número de caminhos ópticos ativos na rede. Nessa abordagem, o algoritmo faz atualizações na tabela de roteamento seguindo uma determinada métrica, geralmente especificada por uma ou mais funções custo. As funções possuem como argumento parâmetros da rede, que podem ser calculados ou mensurados e retornam um novo valor para o custo em um dado enlace, em consonância com seu estado atual. A tabela de roteamento é, então, atualizada com esses novos valores calculados, de forma que uma conexão estabelecida em um dado instante de tempo provavelmente não terá a mesma tabela de roteamento que a conexão estabelecida num instante de tempo anterior.

A literatura apresenta diversos trabalhos que tratam do problema do roteamento em redes ópticas WDM, mais especificamente de como estabelecer custos para os enlaces de redes ópticas, sejam elas estáticas ou dinâmicas, de forma a se conseguir, por exemplo, uma melhor distribuição dos recursos disponíveis na rede. Em especial, para as redes dinâmicas, a abordagem mais utilizada tem sido a consideração de custos adaptativos, seguindo funções predefinidas que tenham como argumentos os parâmetros da rede. [Karasan and Ayanoglu 1998] apresentam uma heurística de seleção dinâmica de rotas e de comprimentos de onda, baseada no caminho menos congestionado (LLR – *Least-Loaded Routing*). Uma abordagem denominada algoritmo de roteamento conjunto (JRA – *Joint Routing Algorithm*) é apresentada por [Wen et al. 2003] para roteamento adaptativo e comparada com outros algoritmos. [Mokhtar and Azizoglu 1998] adotam uma abordagem mais geral para o RWA adaptativo. O algoritmo proposto nesse trabalho considera todas as possíveis rotas entre um par de nós origem e destino e utiliza a informação do estado atual da rede para ponderar as rotas, de forma que a rota em melhores condições esteja no topo da lista das possíveis rotas. Uma abordagem similar é usada por [Dante 2005] com uma comparação entre três algoritmos clássicos de roteamento – o RIP (*Routing Information Protocol*), o OSPF (*Open Shortest Path Function*) e o IGRP (*Interior Gateway Routing Protocol*) – e o algoritmo WLC (*Weighted Link Capacity*) proposto. Já [Brunato et al. 2003] abordam o balanceamento de carga executado a partir de modificações na tabela de roteamento, na tentativa de se obter a melhor rota. Essa rota é analisada e buscada em um conjunto das rotas possíveis e seu uso configura, segundo os autores, a necessidade de modificação na tabela. [Fabry-Asztalos et al. 2000] realizam um estudo comparativo entre três métricas de roteamento adaptativo.

3.2. Roteamento adaptativo-alternativo

O principal objetivo desse trabalho é comparar o desempenho dos algoritmos mencionados anteriormente com uma abordagem mista, conhecida como algoritmo de roteamento adaptativo-alternativo.

No roteamento adaptativo-alternativo, assim como no adaptativo, as rotas são selecionadas de acordo com o estado atual da rede. A diferença entre os dois algoritmos consiste no fato de que no adaptativo alternativo são selecionadas todas as rotas disjuntas, ou seja, rotas que não disponham de enlaces em comum, entre um par de nós origem e destino. Em outras palavras, esse algoritmo é uma fusão do algoritmo alternativo e do algoritmo adaptativo.

Ao tentar selecionar uma rota entre um par de nós, o algoritmo adaptativo-alternativo seleciona todas as rotas disjuntas entre esse par de nós origem e destino, usando o estado atual da rede. Em seguida, essas rotas são ordenadas do menor para o maior custo. A rota escolhida será aquela que tiver comprimentos de onda disponíveis para serem alocados, de acordo com a heurística trabalhada. No caso desse trabalho, essa heurística é a *first-fit*. A estratégia do algoritmo *first-fit* é enumerar todos os comprimentos de onda e selecionar de ordem crescente aquele comprimento de onda disponível de menor índice da lista (primeiro disponível).

O algoritmo completo de RWA, usando roteamento adaptativo-alternativo e alocação de comprimento de onda *first-fit* é descrito no algoritmo 1.

Algoritmo 1 RWA com roteamento adaptativo-alternativo e *first-fit*

Entrada: topologia; nós origem (s) e destino (d)
Saída: rota e comprimento de onda selecionados entre os nós (s) e (d)

1: Algoritmo de Dijkstra seleciona todas as rotas disjuntas entre o par de nós (s) e (d) ;
2: As rotas selecionadas no passo anterior são alocadas no vetor R, ordenadas do menor para o maior custo;
3: **enquanto** um comprimento de onda λ não for selecionado ou a requisição não for bloqueada **faça**
4: escolha da primeira rota em R;
5: escolha do primeiro λ que esteja livre em todos os enlaces que compõe a rota selecionada;
6: **se** houver λ disponível em todos os enlaces da rota **então**
7: seleciona o λ e sai do laço;
8: **caso contrário**
9: retira a rota de R e continua no laço;
10: **fim**
11: **fim** do **laço** '**enquanto**'
12: **se** houve λ selecionado **então**
13: atualiza os custos dos enlaces que compõe a rota selecionada;
14: **caso contrário**
15: bloqueia o estabelecimento da conexão.
16: **fim**

4. Simulação e Resultados

Para avaliar o desempenho dos algoritmos estudados com relação à probabilidade de bloqueio foi feito uso de um simulador de redes ópticas dinâmicas desenvolvido pelos autores usando a linguagem de programação Python. A simulação de redes ópticas transparentes pode ser realizada levando em conta uma demanda de conexões estática, para uma matriz de tráfego estática definida antes da simulação e que não varia ao longo da execução, ou levando em consideração uma demanda de conexões dinâmica, que escolhe aleatoriamente os pares de endereços de origem e destino de uma conexão, o tempo de início da conexão e o período de duração da conexão. O simulador implementado considera um modelo de requisição de conexão dinâmico.

Para os experimentos são consideradas quatro topologias de redes distintas: um anel com nove nós (Figura 2 a)), que tem como característica a baixa quantidade de enlaces e nós com grau 2, uma topologia em malha regular, porém simples, com apenas cinco nós (Figura 2 b)), a topologia *Torus* em uma malha (*mesh-torus*) com 9 nós, tendo cada nó um grau 4 (Figura 2 c)) e uma topologia baseada na rede da *National Science Foundation*, conhecida como NSFNet, Figura 2 d).

Nas execuções da simulação, o critério de parada utilizado é o número de requisições de conexão. São contabilizadas as requisições de conexão e não apenas as conexões estabelecidas com sucesso. Um número significativo de requisições de conexão é executado de maneira que o efeito transitório inicial seja desprezível e o regime permanente de operação da rede predomine.

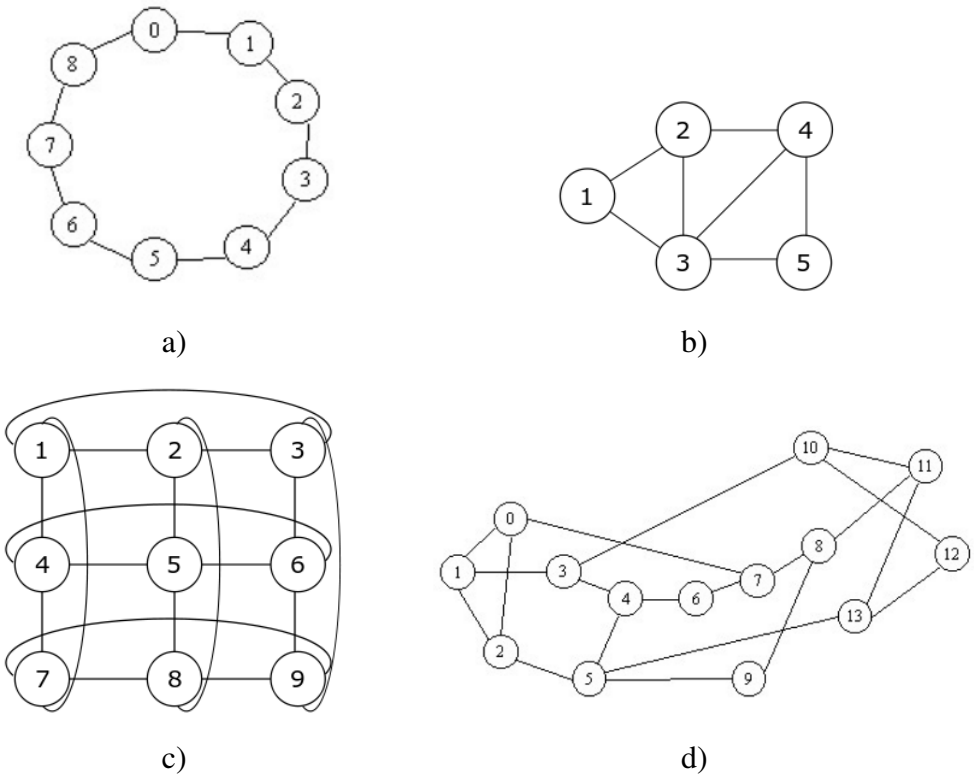

Figura 2. Topologias usadas nos experimentos: a) anel de nove nós, b) rede em malha simples com cinco nós, c) rede *mesh-torus* e d) NSFNet.

Dois cenários de análise são considerados neste artigo. No primeiro cenário, a carga oferecida à rede foi mantida fixa, com valor de 500 erlangs, e o número de comprimentos de onda variou entre 2 e 50 comprimentos de onda por fibra, num total de 24 valores distintos. No segundo cenário, manteve-se o número de comprimentos de onda com valor fixo de 10 e variou-se a carga oferecida na rede entre 10 e 500 erlangs, com incrementos de 20 erlangs, num total de 24 valores distintos de carga. Para cada valor do número de comprimentos de onda (primeiro cenário) ou de carga oferecida (segundo cenário), foram feitas 50000 solicitações de conexão.

Ao fim de cada execução é calculada a probabilidade de bloqueio da rede que serve de métrica de comparação do desempenho dos algoritmos simulados. A probabilidade de bloqueio é definida como a razão entre o número de bloqueios ocorridos sobre o número de requisições efetuadas em toda a rede.

4.1. Primeiro cenário: carga oferecida fixa e número de comprimentos de onda variando

Os resultados das simulações para esse cenário são apresentados nos gráficos de probabilidade de bloqueio em função do número de comprimentos de onda por fibra óptica dispostos na Figura 3 para a topologia em anel, na Figura 4 para a malha com 5 nós, na Figura 5 para a *mesh-torus* e na Figura 6 para a topologia da NSFNet.

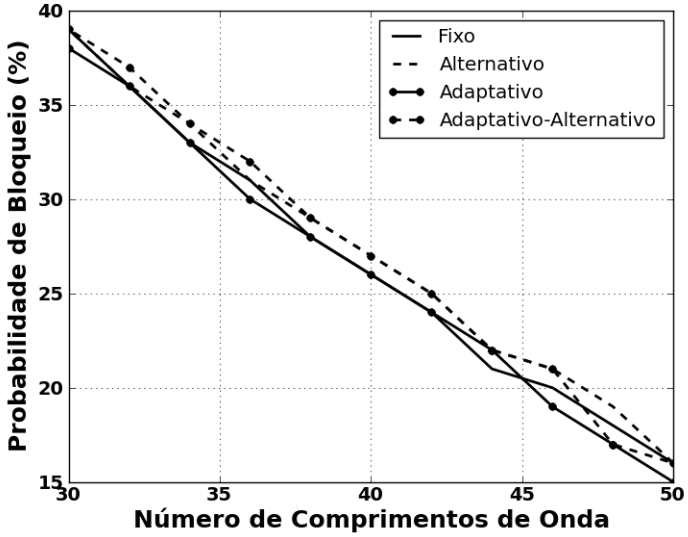

Figura 3. Probabilidade de bloqueio em função do número de comprimentos de onda na fibra para a rede em anel.

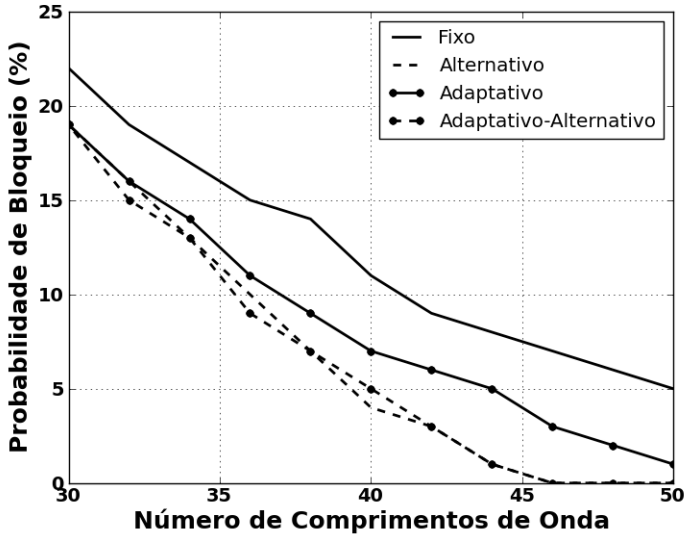

Figura 4. Probabilidade de bloqueio em função do número de comprimentos de onda na fibra para a rede com 5 nós.

Os gráficos mostram que qualquer uma das abordagens tem um desempenho superior ao roteamento fixo e também que essa diferença varia de acordo com as características topológicas da rede na qual o roteamento opera. Por exemplo, ela é significativamente menor na rede em anel, tendo em vista a baixa conectividade que esta rede tem (grau dois em cada nó) do que nas redes em malha. Já entre as outras abordagens de roteamento pode-se observar, principalmente nas topologias em malha, que o roteamento alternativo possui um desempenho igual ou superior ao adaptativo. Observa-se também que o o rote-

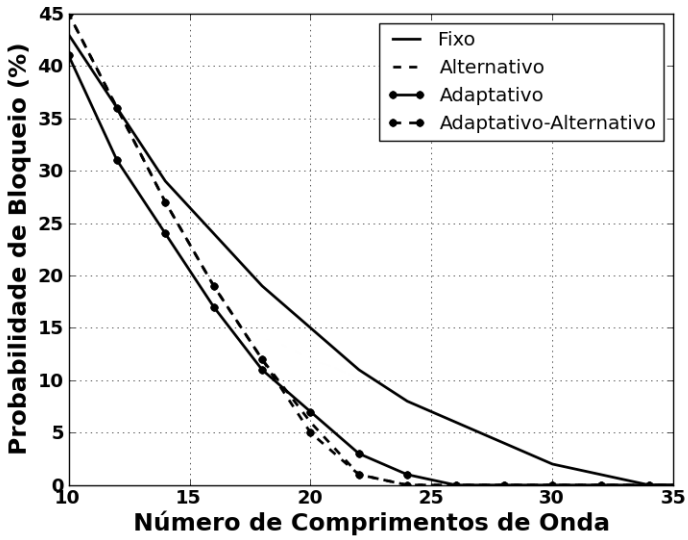

Figura 5. Probabilidade de bloqueio em função do número de comprimentos de onda na fibra para a rede *mesh-torus*.

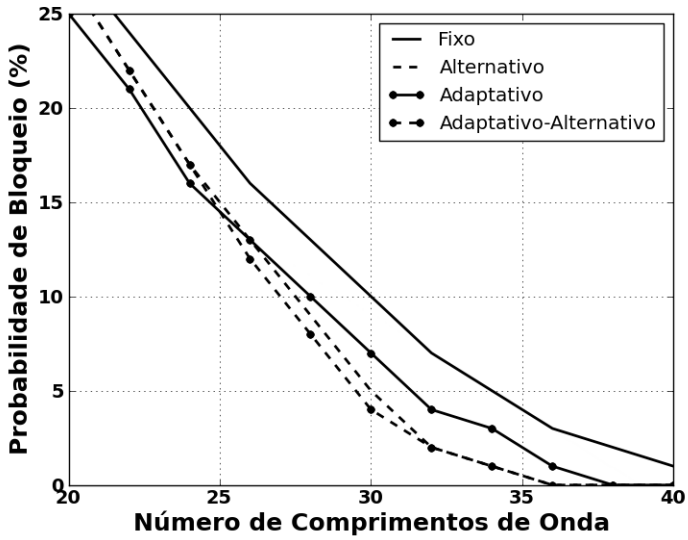

Figura 6. Probabilidade de bloqueio em função do número de comprimentos de onda na fibra para a rede NSFNet.

amento adaptativo-alternativo praticamente possui o mesmo desempenho do alternativo, apresentando uma leve superioridade em alguns casos.

É interessante observar também o número de comprimentos de onda com que a probabilidade de bloqueio se torna nula. Como esperado, esse valor muda de acordo com a topologia considerada. Quanto maior a conectividade da rede, menor o número de comprimentos de onda necessário para anular a incidência de bloqueio nas configurações consideradas. Esse comportamento pode ser exemplificado pela comparação dos resultados entre as redes estudadas. Observando-se os gráficos, pode-se ver que, nos melhores

casos, a rede em anel tem a probabilidade de bloqueio anulada com 50 comprimentos de onda por fibra; na rede de cinco nós, são necessários 47; na *mesh-torus*, 25 comprimentos de onda e na NSFNet, 37.

4.2. Segundo cenário: carga oferecida variando e número de comprimentos de onda fixo

Os resultados das simulações para esse cenário são apresentados nos gráficos de probabilidade de bloqueio em função da carga oferecida dispostos na Figura 7 para a topologia em anel, na Figura 8 para a malha com 5 nós, na Figura 9 para a *mesh-torus* e na Figura 10 para a topologia da NSFNet.

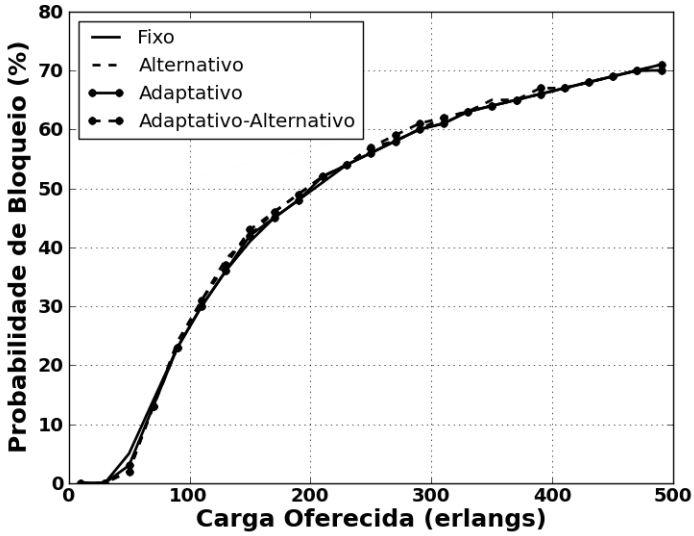

Figura 7. Probabilidade de bloqueio em função da carga oferecida para a rede em anel.

Os gráficos mostram que o uso de roteamento não-fixo, *i.e.* alternativo, adaptativo ou alternativo-adaptativo, acarreta uma diminuição na probabilidade de bloqueio para cargas baixas. Porém, a partir de um certo limiar, que varia em função da topologia, essa abordagem já não produz ganho se comparado ao roteamento fixo. Na topologia em anel, por exemplo, praticamente não há diferença de desempenho. Já na *mesh-torus* a diferença é bem mais aparente.

É interessante notar também que o desempenho do algoritmo adaptativo, destacado principalmente na *mesh-torus*, se torna superior aos demais algoritmos, fato que não ocorria no cenário anterior.

5. Conclusões

Nesse artigo, são comparadas quatro abordagens de roteamento do ponto de vista da probabilidade de bloqueio. Essa comparação é feita variando-se o número de comprimentos de onda disponíveis em cada fibra óptica mas com um valor fixo de carga oferecida na rede e, depois, variando-se a carga oferecida na rede e mantendo-se fixo o número de comprimentos de onda.

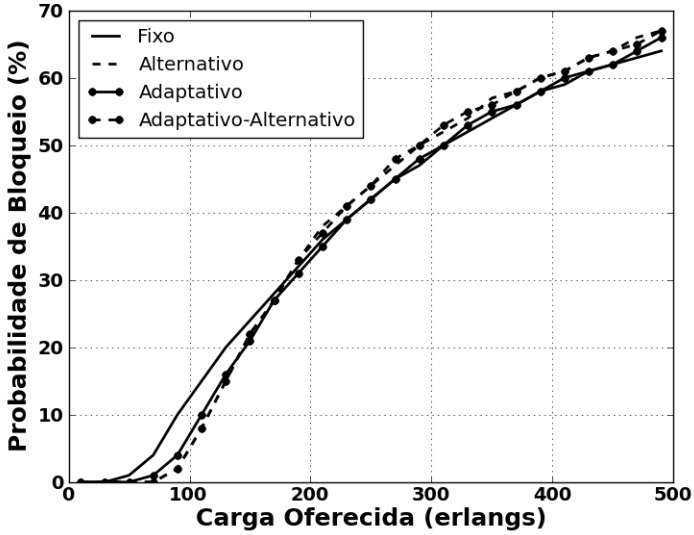

Figura 8. Probabilidade de bloqueio em função da carga oferecida para a rede com 5 nós.

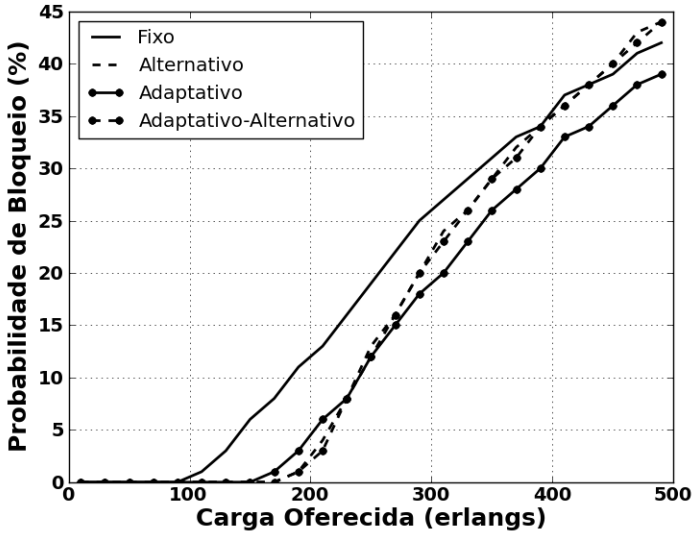

Figura 9. Probabilidade de bloqueio em função da carga oferecida para a rede *mesh-torus*.

Esses dois cenários dão uma visão mais completa do desempenho dessas abordagens de roteamento, gerando resultados que podem ajudar o operador e o projetista da rede a decidir que roteamento usar a partir das características de topologia e tráfego que esta tenha. Dentre os possíveis benefícios de uma escolha correta da abordagem de roteamento a ser utilizada se destaca a esperada diminuição no número de comprimentos de onda para se manter um dado número de bloqueios na rede. Tal característica se traduz em sistemas com menor custo de instalação e manutenção da rede. Por outro lado, se garante que a extensibilidade da rede projetada praticamente não será afetada, pois há a capacidade de se suportar um volume maior de tráfego.

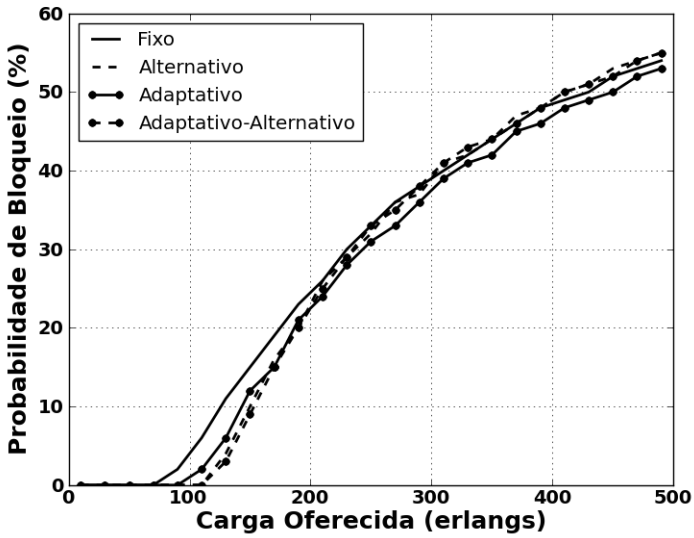

Figura 10. Probabilidade de bloqueio em função da carga oferecida para a rede NSFNet.

No primeiro cenário, no qual a carga oferecida foi mantida fixa e número de comprimentos de onda variou, observou-se que o uso de roteamento não-fixo, *i.e.* alternativo, adaptativo ou alternativo-adaptativo, leva a uma menor probabilidade de bloqueio se comparado ao uso de roteamento fixo. Observou-se também que, dependendo da topologia o número de comprimentos de onda necessários para não haver incidência de bloqueios (probabilidade de bloqueio nula) pode variar, sendo menor para topologias com maior conectividade.

No segundo cenário, no qual a carga oferecida variou e o número de comprimentos de onda foi mantido fixo, observou-se que para topologias com baixa conectividade, como o anel, não existe uma diferença significativa do algoritmo usado, mas para redes com alta conectividade, como a *mesh-torus*, essa diferença se torna mais acentuada, o que representa uma vantagem do algoritmo adaptativo sobre os demais, fato não ocorrido no cenário anterior. No entanto, a partir de um certo limiar de carga, que varia em função da topologia, praticamente não existem vantagens de nenhum algoritmo com relação aos outros.

Assim, pode-se concluir que a escolha correta da abordagem de roteamento a ser utilizada pode reduzir o número de comprimentos de onda para um dado número de bloqueios na rede. Tal característica se traduz em sistemas com menor custo de instalação e manutenção da rede. Por outro lado, se garante que a extensibilidade da rede projetada praticamente não será afetada, pois há a capacidade de se suportar um volume maior de tráfego.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se fazer uso desse trabalho como ponto de partida para novas implementações, que objetivem, por exemplo, fazer uma avaliação comparativa entre os algoritmos avaliados e novas heurísticas para roteamento e para a alocação de comprimento de onda. Além disso, podem ser estabelecidos modelos matemáticos para a probabilidade de bloqueio e relações analíticas entre ela e a topologia

da rede, o que pode servir de base para a implementação de algoritmos de roteamento que tenham como parâmetro principal não só a quantidade de comprimentos de onda disponíveis no enlace, mas a quantidade de enlaces da rede, o comprimento máximo que os enlaces podem possuir para manter a qualidade de conexão e a carga oferecida na rede.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Capes, pelo suporte financeiro ao desenvolvimento desse trabalho e ao Iecom, pela estrutura física necessária para a sua realização.

Referências

Brunato, M., Battiti, R., and Salvadori, E. (2003). Dynamic Load Balancing in WDM Networks. *Optical Networks Magazine*.

Dante, R. G. (2005). *Algoritmos de Roteamento e Atribuição de Comprimentos de Onda para as Redes Ópticas Inteligentes e Transparentes*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

Fabry-Asztalos, T., Bhide, N., and Sivalingam, K. M. (2000). Adaptive Weight Functions for Shortest Path Routing Algorithms for Multi-Wavelength Optical WDM Networks. In *Proceedings of ICC 2000*, volume 3, pages 1330–1334, New Orleans, LA.

Fonseca, I. E. (2005). *Uma Abordagem para Aprovisionamento e Diferenciação de QoS Óptico na Presença de FWM em Redes Ópticas Transparentes*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

Karasan, E. and Ayanoglu, E. (1998). Effects of Wavelength Routing and Selection Algorithms on Wavelength Conversion Gain in WDM Networks. In *IEEE/ACM Transactions on Networking*, volume 6, pages 186–196.

Mokhtar, A. and Azizoglu, M. (1998). Adaptive Wavelength Routing in All-Optical Networks. In *IEEE/ACM Transactions on Networking*, volume 6, pages 197–206.

Mukherjee, B. (2006). *Optical WDM Networks*. Springer, California, USA.

Ramaswami, R. and Sivarajan, K. N. (2002). *Optical Networks: A Practical Perspective*. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Francisco, California, U.S.A., 2ª edition.

Rouskas, G. N. and Perros, H. G. (2002). A Tutorial on Optical Networks. Networking 2002 Tutorials - LNCS.

Wen, H., He, R., Li, L., and Wang, S. (2003). Adaptive Routing and Wavelength Assignment Algorithms in WDM Grooming Networks. In *Proceedings of ICCT2003*, volume 3.

Zang, H., Jue, J. P., and Mukherjee, B. (2000). A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks. *Optical Networks Magazine*.