

# Avaliação de Desempenho de Algoritmos para Alocação Dinâmica de Comprimentos de Onda em Redes Ópticas Transparentes

André C. B. Soares\*, William F. Giozza

<sup>1</sup>NUPERC – Universidade Salvador – UNIFACS  
R. Ponciano de Oliveira, 126, Rio Vermelho – 41950-275 Salvador, BA

andre.soares@unifacs.br, giozza@unifacs.br

**Abstract.** *This paper describes and evaluates the performance of the main routing and wavelength assignment (RWA) algorithms for all-optical ring networks under different traffic load scenarios. Further, this work evaluates the impact of update network link state information in the performance of the RWA algorithms.*

**Resumo.** *Este artigo apresenta e avalia o desempenho dos principais algoritmos de alocação e roteamento de comprimento de onda operando anéis ópticos transparentes sob diversas condições de tráfego. Em particular, o estudo avalia o impacto de atualização de informações sobre o estado da rede no desempenho dos diversos algoritmos existentes.*

## 1. Introdução

As redes ópticas podem ser classificadas em opacas ou transparentes [Ramaswami and Sivarajan, 1998]. As redes ópticas opacas realizam o roteamento de comprimentos de onda no domínio eletrônico. Nesse tipo de rede são necessários conversores OEO (Ópto-Eletró-Ópticos) responsáveis por converter o sinal óptico em sinal elétrico e vice-versa. Conversores OEO têm o inconveniente de inserir atrasos de processamento além de aumentar significativamente o custo dos equipamentos. Nas redes ópticas transparentes, o roteamento de comprimentos de onda é realizado no domínio óptico eliminando os conversores OEO e suas limitações.

O crescimento do número de usuários da Internet e o surgimento de novas aplicações envolvendo voz e vídeo têm provocado um aumento considerável na demanda de banda passante nas redes de transporte que constituem os backbones dos provedores de serviços de telecomunicações. Com o objetivo de atender, de forma satisfatória, tal demanda de tráfego, tem sido desenvolvida uma nova geração de redes de transporte baseada em uma infra-estrutura óptica inteligente. As redes ópticas começaram a surgir com o uso intensivo das fibras ópticas a partir dos anos 80 [Giozza et al., 1991]. Inicialmente, utilizavam o TDM - *Time Division Multiplexing* como técnica de multiplexação subutilizando a enorme capacidade de transmissão das fibras ópticas. A técnica TDM utiliza

---

\*Aluno do Mestrado em Redes de computadores da UNIFACS e bolsista da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado da Bahia-FAPESB.

apenas um comprimento de onda na fibra e realiza o compartilhamento da fibra dividindo o tempo de sua utilização. Com o objetivo de melhor aproveitar a capacidade de transmissão das fibras ópticas, as redes ópticas passaram a usar o WDM - *Wavelength Division Multiplexing*, uma técnica de multiplexação que divide a fibra óptica em vários canais de frequências ópticas (comprimentos de onda) diferentes. Com o WDM é possível o estabelecimento de mais de uma conexão através de uma única fibra óptica.

As redes ópticas podem ser classificadas em opacas ou transparentes [Ramaswami and Sivarajan, 1998]. As redes ópticas opacas realizam a comutação de comprimentos de onda no domínio eletrônico. Nesse tipo de rede são necessários conversores OEO (Opto-Eletró-Ópticos) responsáveis por converter o sinal óptico em sinal elétrico e vice-versa. Conversores OEO têm o inconveniente de inserir atrasos de processamento além de aumentar significativamente o custo dos equipamentos. Nas redes ópticas transparentes, a comutação de comprimentos de onda é realizada no domínio óptico eliminando os conversores OEO e suas limitações.

Para estabelecer uma conexão entre dois nós através de uma rede óptica transparente é necessário alocar um comprimento de onda. Para otimizar os recursos da rede óptica, a alocação de um comprimento de onda deve ser feita de forma a maximizar o número de conexões possíveis de serem estabelecidas futuramente. Vários algoritmos de alocação de comprimentos de onda em redes ópticas transparentes têm sido propostos [Zang et al., 2000]. Todos eles têm por objetivo minimizar a probabilidade de bloqueio de novas conexões em uma rede óptica transparente.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta o problema de roteamento e alocação de comprimento de onda em redes ópticas transparentes, descrevendo as principais técnicas de roteamento e os algoritmos de alocação de comprimento de onda. A Seção 3 descreve o problema do roteamento e alocação de comprimento de onda baseado em informações desatualizadas sobre os estados dos enlaces da rede. Na Seção 4 apresenta-se e discute-se os resultados das simulações comparando os algoritmos de alocação de comprimento de onda descritos nas seções anteriores, sob diversos cenários de tráfego, e as conclusões são apresentadas na última Seção.

## **2. Roteamento e Alocação de Comprimentos de Onda**

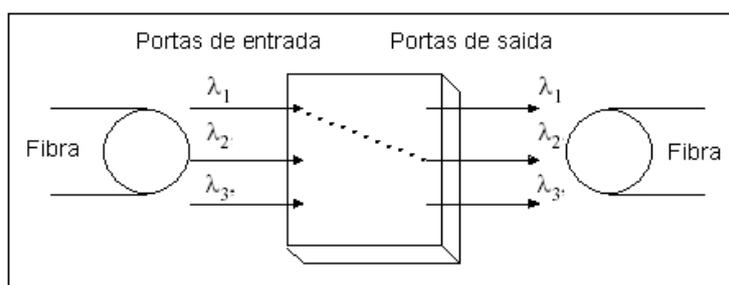
O problema de rotear e alocar comprimentos de onda em redes ópticas transparentes é conhecido como RWA (*Routing and Wavelength Assignment*). O problema RWA é geralmente dividido em dois subproblemas, um subproblema de roteamento de comprimento de onda e um subproblema de alocação de comprimento de onda.

O problema RWA pode ainda ser classificado em RWA estático ou RWA dinâmico. No problema RWA estático, todas as conexões são conhecidas previamente e o objetivo é minimizar o número de comprimentos de onda necessários para atender essas conexões. Já no problema RWA dinâmico, as conexões não são conhecidas previamente. Neste último caso, o objetivo é alocar comprimentos de onda tentando minimizar a probabilidade de bloqueio de futuras conexões, dado um conjunto de comprimentos de onda disponíveis. Neste trabalho desenvolve-se o problema RWA dinâmico, mais compatível com os requisitos de flexibilidade das modernas redes de transporte.

Uma rede óptica transparente é formada por nós interconectados por enlaces de fibra óptica ponto-a-ponto criando uma determinada topologia. Nas redes WDM, as fibras ópticas são divididas em canais WDM de diferentes frequências ópticas, chamados de comprimentos de onda. Para o estabelecimento de uma conexão entre dois nós, A e B, é necessário inicialmente escolher uma rota e em seguida alocar um comprimento de onda disponível. Após essas etapas, é estabelecido um caminho óptico (*lightpath*) do nó A para o nó B, isto é, um comprimento de onda será utilizado para transmitir dados do nó A para o nó B.

Na ausência de conversores de comprimento de onda, uma conexão deve utilizar o mesmo comprimento de onda em todos os enlaces que compõem o caminho óptico. Essa propriedade é conhecida como continuidade obrigatória de comprimento de onda.

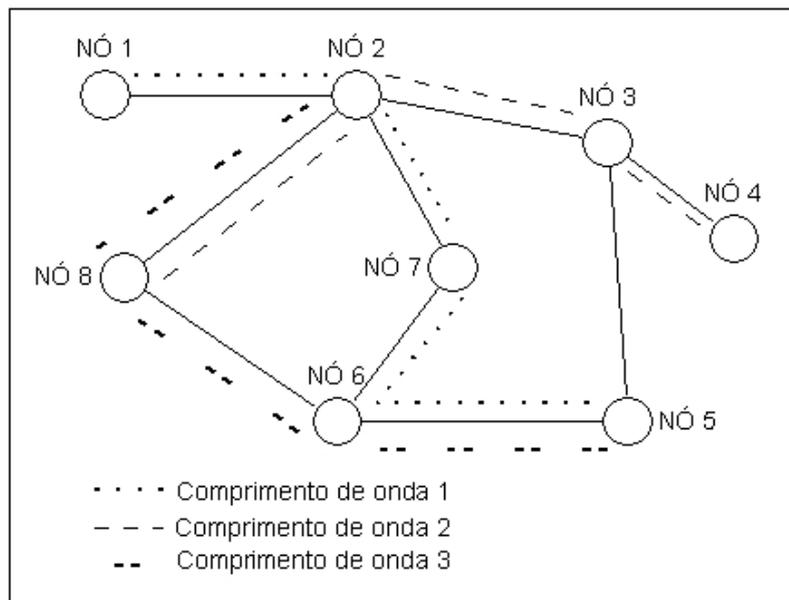
Conversores de comprimento de onda são dispositivos localizados nos nós da rede óptica que possibilitam a conversão de um comprimento de onda de entrada em um outro comprimento de onda de saída, como ilustra a Figura 1. Esses dispositivos permitem uma melhor utilização dos comprimentos de onda, minimizando a probabilidade de bloqueio de conexões [Chu et al., 2003a].



**Figura 1: Conversor de comprimento de onda.**

Na Figura 2 ilustramos a topologia de uma rede óptica transparente. Inicialmente, existem algumas conexões estabelecidas. Considera-se então uma situação em que uma nova requisição é feita, no exemplo ilustrado (Figura 2), para conectar o nó 6 ao nó 4 utilizando a rota (nó 6, nó 5, nó 3 e nó 4). Sem a utilização de conversores de comprimento de onda tal requisição será bloqueada mesmo existindo comprimentos de onda (descontínuos) livres. Em todos os enlaces que compõem a rota (nó 6, nó 5, nó 3 e nó 4) existe, pelo menos 1 comprimento de onda disponível, mas não existe continuidade de comprimento de onda ao longo da rota.

Todavia, conversores de comprimento de onda são dispositivos ainda caros. Uma alternativa que permite eliminar os custos dos conversores de comprimento de onda é a adoção de estratégias de alocação de comprimento de onda que minimizem a probabilidade de bloqueio de futuras conexões numa rede óptica transparente. Vários trabalhos recentes demonstram que os algoritmos de roteamento e alocação de comprimento de onda são os principais instrumentos para diminuir a probabilidade de bloqueio em redes ópticas transparentes [Chu et al., 2003b] [Soares and Giozza, 2003].



**Figura 2: Rede óptica.**

## 2.1. Tipos de Roteamento

O problema de roteamento de comprimento de onda é atualmente tratado com as seguintes técnicas: roteamento fixo, roteamento fixo alternativo e o roteamento adaptativo (Figura 3) [Zang et al., 2000].

No roteamento fixo todos os pares de nós origem e destino possuem apenas uma rota fixa estabelecida previamente. Na existência de mais de uma requisição por par de nó origem-destino todas essas requisições disputarão o mesmo recurso (conjunto de comprimentos de onda). Isso implicará em uma maior probabilidade de bloqueio. Esse tipo de roteamento é muito simples de ser implementado, mas possui desvantagens como: intolerância a falhas e uma maior probabilidade de bloqueio.

O roteamento fixo alternativo é caracterizado pela existência de mais de uma rota estabelecida previamente. Ao contrário do roteamento fixo, no roteamento fixo alternativo todas as combinações de pares de nós possuem mais de uma rota. Para isso, são necessárias tabelas de rotas para armazenar as rotas disponíveis, ordenadas por custo, para um determinado nó de destino. O roteamento fixo alternativo possui um certo nível de tolerância a falhas e menor probabilidade de bloqueio quando comparado ao roteamento fixo.

No roteamento adaptativo, as rotas são escolhidas dinamicamente em função do estado da rede. Um exemplo de roteamento adaptativo é o caminho adaptativo de menor custo. Nessa técnica, todos os enlaces ocupados recebem custo  $\infty$  e os enlaces livres recebem custo 1. Quando surge uma requisição de caminho óptico de um nó A para um nó B, é calculado o custo de todas as rotas do nó A para o nó B e a rota utilizada será a de menor custo (soma dos custos dos enlaces que compõem a rota). As vantagens do roteamento adaptativo são uma maior tolerância a falhas e uma baixa probabilidade de bloqueio quando comparado com o roteamento fixo e com o roteamento fixo alternativo. Por outro lado, o roteamento adaptativo é mais complexo computacionalmente.

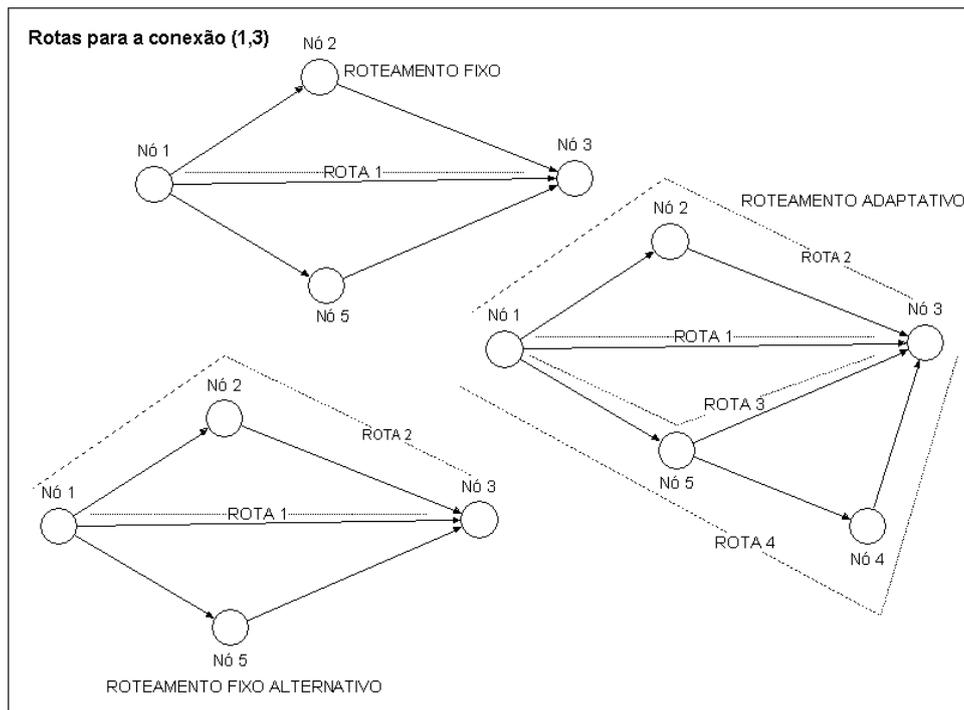


Figura 3: Tipos de roteamento.

## 2.2. Algoritmos para Alocação de Comprimento de Onda

Nesta seção ilustraremos o funcionamento dos principais algoritmos de alocação de comprimento de onda propostos na literatura: *First-Fit*, *Random Wavelength Assignment*, *Most-Used*, *Least-Used*, *Max-Sum*, *Relative Capacity Loss*, *Distributed Relative Capacity Loss* e *Minimal Blocking* [Soares and Giozza, 2003]. Os algoritmos serão aplicados no cenário de uma rede óptica transparente em anel unidirecional composta por 6 nós, sem conversores de comprimento de onda, e 4 comprimentos de onda ( $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ ,  $\lambda_4$ ) por enlace, como ilustra a Figura 4.

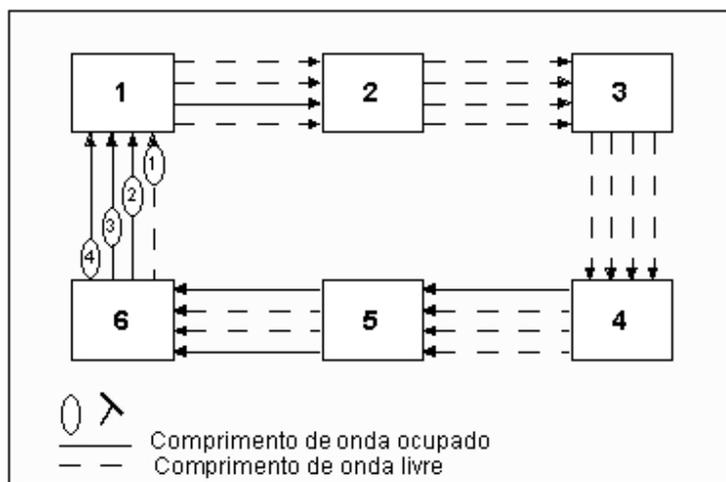


Figura 4: Anel óptico unidirecional com 6 nós e 4 comprimentos de onda.

Utilizaremos a notação conexão (x,y) para representar uma conexão com origem no nó x e destino no nó y. A mesma idéia é empregada para representar uma requisição de conexão, requisição (x,y). O anel óptico possui, no estado inicial, as seguintes conexões estabelecidas: conexão (4,6) utilizando  $\lambda_1$ , conexão (6,2) utilizando  $\lambda_2$ , conexão (6,1) utilizando  $\lambda_3$  e a conexão (5,1) utilizando  $\lambda_4$ . Conhecendo os estados dos enlaces do anel é possível calcular a probabilidade de bloqueio para uma próxima conexão que é dada por:  $Pb_{prox} = NCb/NC$ , onde  $NCb$  é número de conexões bloqueadas dado o estado inicial e  $NC$  é o número total de conexões. A  $Pb_{prox}$  no exemplo da Figura 4 é igual a 11/30 (estão sendo desconsideradas as conexões com o mesmo nó de origem e destino). Suponha agora que o próximo pedido de conexão é do nó 2 para o nó 4. A requisição (2,4) pode ser estabelecida com qualquer um dos 4 comprimentos de onda ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ ). A escolha do comprimento de onda é feita pelo algoritmo de alocação de comprimento de onda com o objetivo de minimizar a probabilidade de bloqueio. A Tabela 1 mostra  $Pb_{prox}$  após o estabelecimento da conexão (2,4) em função do comprimento de onda alocado.

**Tabela 1.**  $Pb_{prox}$  após o estabelecimento da conexão (2,4).

Comprimento de onda	$Pb_{prox}$
$\lambda_1$	13/30
$\lambda_2$	11/30
$\lambda_3$	12/30
$\lambda_4$	11/30

O algoritmo **First-Fit** (FF) enumera todos os comprimentos de onda (1, 2, ..., n = 4). Quando surge uma requisição de conexão, o FF aloca o comprimento de onda disponível (i.e., livre) com menor índice. O algoritmo FF provoca um desbalanceamento de carga, sobrecarregando os comprimentos de onda de menor índice. Na alocação de um comprimento de onda para o estabelecimento da requisição (2,4) no exemplo da Figura 4, o FF alocará o  $\lambda_1$ , que é o comprimento de onda disponível de menor índice. Este algoritmo não necessita de informação global dos enlaces da rede. O algoritmo FF precisa apenas conhecer o estado (livre ou ocupado) dos comprimentos de onda dos enlaces que compõem o caminho da conexão a ser estabelecida. O algoritmo FF possui baixo custo computacional, pois não precisa pesquisar o estado de todos os enlaces da rede e pode ser utilizado em qualquer topologia de rede.

O algoritmo **Random Wavelength Assignment** (RD) cria uma lista com todos os comprimentos de onda disponíveis para atender a requisição de caminho óptico. Em seguida o algoritmo RD escolhe um dos comprimentos de onda de maneira aleatória. Para o atendimento da requisição (2,4) (Figura 4), o RD poderá alocar qualquer um dos 4 comprimentos de ondas disponíveis, podendo resultar em diferentes probabilidades de bloqueio para a futura conexão. O algoritmo RD é computacionalmente simples, trabalha realizando balanceamento de carga e não necessita de informação global sobre os estados dos enlaces da rede.

O algoritmo **Most Used** (MU) sempre aloca o comprimento de onda disponível mais utilizado, baseado nas informações do estado atual da rede. É feita uma contagem de quantos enlaces estão sendo utilizados por comprimento de onda. Em seguida, o algoritmo MU aloca o comprimento de onda disponível com o maior número de enlaces

ocupados. Para estabelecer a conexão (2,4) (Figura 4), o MU poderá alocar o  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  ou  $\lambda_4$ , pois são os comprimentos de onda mais utilizados (2/6).

O algoritmo *Least Used* (LU) é o oposto do MU, sempre aloca o comprimento de onda disponível menos utilizado, baseado nas ingorações do estado atual da rede. Para estabelecer a conexão (2,4) (Figura 4), por exemplo, o LU alocará o  $\lambda_3$ .

O algoritmo *Max Sum* (MS) tem como objetivo alocar um comprimento de onda minimizando a perda de capacidade da rede óptica [Barry and Subramaniam, 1997]. Isso significa alocar um comprimento de onda  $\lambda_z$  que minimiza a probabilidade de bloqueio para futuras conexões com esse mesmo  $\lambda_z$ . Ao receber uma requisição de caminho óptico, o MS considera todos os caminhos possíveis com exceção da própria requisição. Em seguida o MS marca para cada comprimento de onda disponível os caminhos que serão bloqueados se o comprimento de onda em questão for alocado. A perda total de capacidade, na verdade, é a soma de todos os caminhos futuramente bloqueados pela alocação do  $\lambda_z$ . O algoritmo MS aloca o comprimento de onda com menor número de caminhos bloqueados, isto é o comprimento de onda com menor perda de capacidade total. Para estabelecer a conexão (2,4) (Figura 4), por exemplo, o MS poderá alocar o  $\lambda_1$  ou o  $\lambda_2$ , pois ambos apresentam menor perda de capacidade.

O algoritmo *Relative Capacity Loss* (RCL) é similar ao MS, [Zang et al., 2000] mas analisa a perda de capacidade relativa. O RCL analisa qual será a perda relativa na alocação de cada um dos comprimentos de onda disponíveis. No atendimento da requisição (2,4) (Figura 4), por exemplo, a perda relativa para a conexão (1,3) será de 1/3 para o  $\lambda_1$ , 0 para o  $\lambda_2$ , 1/3 para o  $\lambda_3$  e 1/3 para o  $\lambda_4$ . Esse cálculo é feito para todas as possíveis conexões com exceção da requisição. Em seguida é feito um somatório das perdas relativas por comprimento de onda. Por fim, será alocado o comprimento de onda de menor perda relativa. Para a requisição (2,4), por exemplo, o RCL alocará o  $\lambda_2$ .

O algoritmo *Distributed Relative Capacity Loss* (DRCL) tem a mesma heurística do RCL [Zang et al., 2000], a diferença é que o DRCL realiza os cálculos de maneira distribuída diminuindo o custo de processamento. Cada nó mantém uma tabela RCL e essas informações são trocadas entre os nós. Assim, cada nó pode saber a perda relativa para qualquer destino em qualquer comprimento de onda. O custo computacional é menor do que o do RCL, pois é realizado de forma distribuída.

*Minimal Blocking* (MB) é um algoritmo para alocação de comprimento de onda exclusivamente em redes ópticas em anel e tem como objetivo alocar comprimentos de onda minimizando a probabilidade de futuros bloqueios [Waldman et al., 2000]. O algoritmo MB trabalha com métricas diferentes para o tráfego uniforme e exponencial. No tráfego uniforme todas as conexões têm a mesma probabilidade de serem requeridas, independentemente do número de enlaces de cada caminho óptico. No tráfego exponencial, a probabilidade de uma conexão ser solicitada diminui com o aumento do número de enlaces do caminho óptico. No caso do tráfego uniforme, o funcionamento básico do algoritmo MB segue os passos abaixo:

1. colocar na lista A, os  $\lambda$ 's disponíveis em ordem crescente de tamanho de buraco. Buraco é o conjunto de enlaces contínuos livres num anel em um determinado  $\lambda$  como mostra a Figura 5 onde  $n_i = 5$  (tamanho do buraco).
2. verificar se existe algum buraco dentro de outro. Se existir, esses devem ser colo-

cados na lista B.

3. se na lista B tiver apenas um  $\lambda$ , esse deve ser alocado. Se a lista B tiver mais de um elemento vá para o 4º passo.
4. Se

$$ni < H + 2 \cdot \sqrt{H} \quad (1)$$

onde  $H$  é a quantidade de enlaces da requisição do caminho fotônico. Então aloque o  $\lambda$  com a inserção mais assimétrica. Isto é, que novos buracos resultantes tenham tamanhos os mais assimétricos. Caso contrário minimize:

$$pi = H \cdot ni + ai \cdot bi \quad (2)$$

onde  $ni$  é o tamanho do buraco,  $ai$  e  $bi$  são os novos buracos que surgiram à direita e a esquerda.

Seguindo os passos do algoritmo MB para o atendimento da requisição (2,4) (Figura 4) a lista A será composta por:  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_4, \lambda_3$ . A lista B será composta por:  $\lambda_2, \lambda_4$ . Como a lista B possui mais de um  $\lambda$  e (1) é satisfeita, então o algoritmo MB deve alocar o  $\lambda$  de menor buraco da lista B de forma mais assimétrica. Portanto, o MB deve alocar o  $\lambda_2$ .

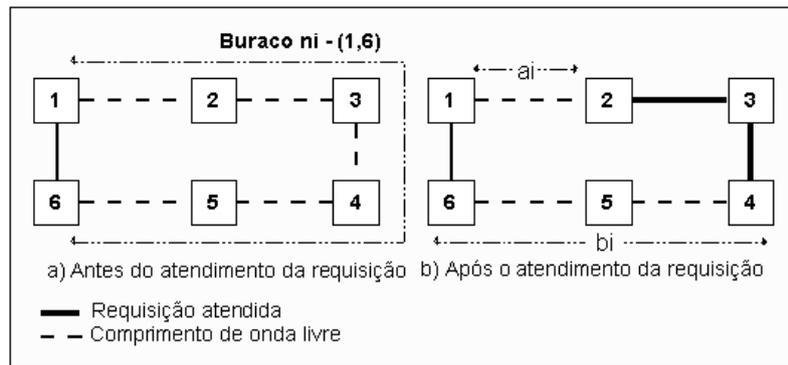


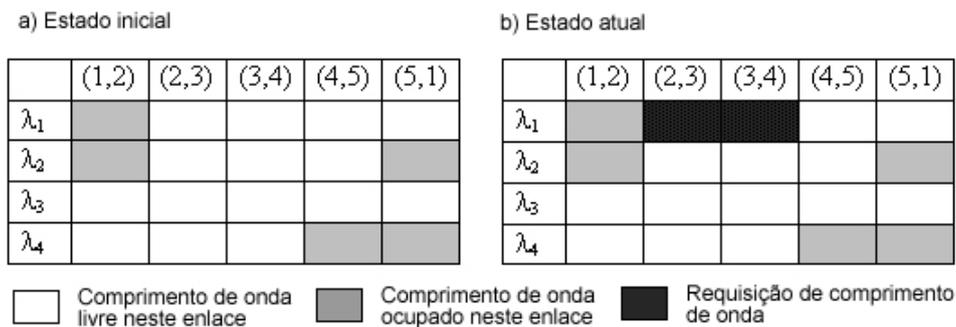
Figura 5: Buraco para  $\lambda_3$  no caso do algoritmo MB.

### 3. Impacto de Informações Desatualizadas dos Estados dos Enlaces da Rede no Comportamento dos Algoritmos RWA

Para alocar um comprimento de onda e estabelecer uma determinada conexão entre dois nós ópticos é necessário saber, pelo menos, os estados dos enlaces ópticos que formam a requisição. Quando um comprimento de onda é alocado ou liberado, os estados dos enlaces da rede óptica mudam. Portanto, atualizações freqüentes dos estados dos enlaces da rede são requeridas. Porém, as requisições de novas conexões podem chegar antes que as atualizações dos estados dos enlaces da rede óptica sejam realizadas. Neste caso, o algoritmo de alocação de comprimento de onda não terá informações atuais dos estados dos enlaces, podendo alocar um comprimento de onda ocupado ou até informar um estado de bloqueio mesmo havendo comprimentos de onda disponíveis [Zhou and Yuan, 2002].

No exemplo ilustrado na Figura 6, no estado inicial existiam 3 conexões estabelecidas: conexão (1,2), conexão (5,2) e conexão (4,1). No estado atual, um novo caminho óptico está estabelecido pela conexão (2,4) utilizando o  $\lambda_1$ . Então, surge uma nova requisição (2,3). Neste exemplo o First-Fit é usado como algoritmo de alocação de comprimento de onda. Suponha, entretanto que a requisição (2,3) é feita antes dos estados dos enlaces serem atualizados. O algoritmo First-Fit, então alocará o  $\lambda_1$ , mas este comprimento de onda já está ocupado. Neste caso, a requisição (2,3) será bloqueada efetivamente pela rede mesmo existindo comprimentos de onda disponíveis para atendê-la. Este exemplo ilustra o principal tipo de problema causado por informações desatualizadas dos estados dos enlaces da rede óptica no funcionamento dos algoritmos RWA.

Neste artigo considera-se o uso pela rede de um algoritmo de estado de enlace para atualizações dos estados dos enlaces da rede óptica.



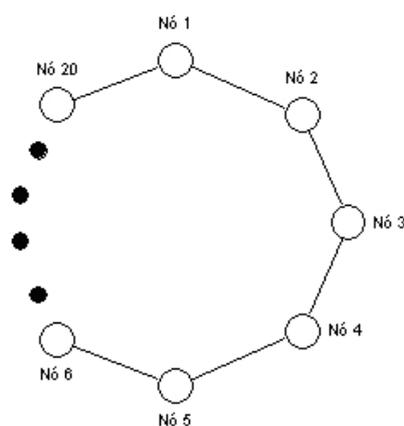
**Figura 6: Tabela de estados dos enlaces ilustrando o efeito das informações desatualizadas.**

#### 4. Simulações e Resultados

Dada a complexidade da solução analítica para o cálculo da probabilidade de bloqueio de conexões em redes ópticas transparentes e a inexistência de sistemas reais disponíveis para medições, foi utilizada a técnica de simulação para calcular a probabilidade de bloqueio dos algoritmos de alocação de comprimentos de onda em redes ópticas transparentes. Como não foi encontrada ferramenta alguma para simulação de algoritmos de alocação de comprimentos de onda em redes ópticas transparentes com código fonte aberto, documentada e validada, desenvolvemos uma ferramenta para tal finalidade chamada SimRWA [Soares et al., 2004].

No modelo utilizado nos experimentos, a taxa de chegada de requisições por nó é um processo poissoniano de taxa média  $\tau$ . O tempo de atendimento das conexões é distribuído exponencialmente com média  $1/\mu$ . A Intensidade de tráfego gerada por nó é dada por  $\rho = \tau/\mu$ . A rede óptica não possui conversores de comprimento de onda e todas as conexões devem utilizar o mesmo comprimento de onda em todos os enlaces.

A Figura 7 ilustra a topologia em anel unidirecional utilizada para avaliação dos algoritmos de alocação de comprimento de onda. A escolha preliminar da topologia em anel é justificada pela facilidade no tratamento de falhas e pelo fato das redes ópticas transparentes surgirem como uma tendência natural na evolução das redes SDH/SONET, amplamente difundidas na topologia em anel.



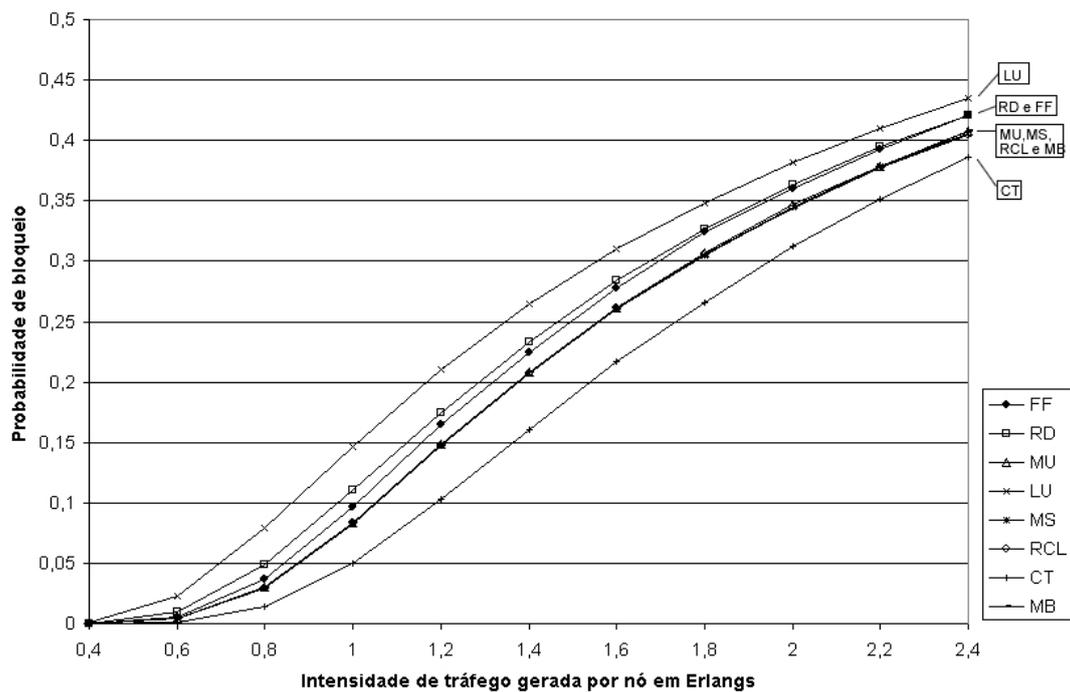
**Figura 7: Anel unidirecional utilizado como modelo para simulação.**

A seguir serão apresentados os resultados de simulações comparando os algoritmos de alocação de comprimento de onda. Será apresentado também o desempenho da conversão total (CT), de comprimentos de onda em cada nó da rede, ilustrando o limite inferior de probabilidade de bloqueio, isto é, o caso ótimo. Os algoritmos de alocação de comprimentos de onda foram submetidos a dois tipos diferentes de tráfego: uniforme e exponencial. No tráfego uniforme, todas os pares de nós origem-destino possuem a mesma probabilidade de fazer uma requisição de conexão, independentemente do número de enlaces que formam o caminho. Já no tráfego exponencial, aumentando o número de enlaces que compõem o caminho óptico diminui a probabilidade desse par origem-destino fazer uma requisição de conexão. Para cada simulação foram feitas 10 replicações e em cada replicação foram geradas 100.000 requisições.

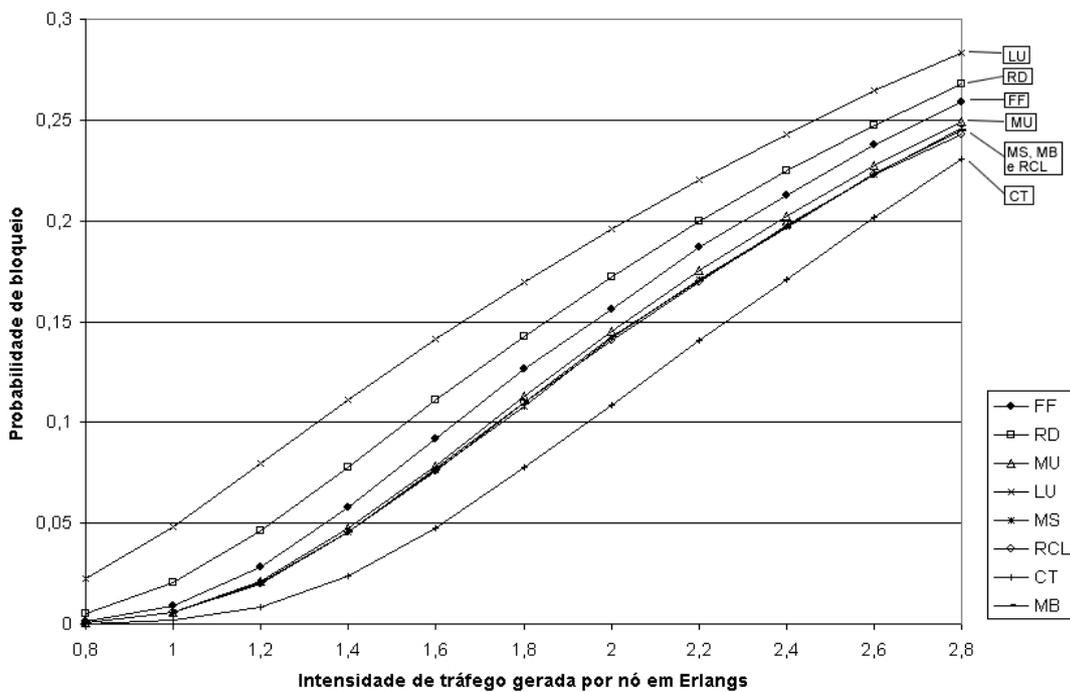
A Figura 8 mostra o desempenho de um anel óptico transparente unidirecional com 20 nós e 16 comprimentos de onda sob tráfego uniforme e com os algoritmos trabalhando com informações dos estados dos enlaces atualizadas.

A Figura 9 mostra o desempenho de um anel óptico transparente unidirecional com 20 nós e 16 comprimentos de onda sob tráfego exponencial e com os estados dos enlaces sempre atualizados.

De um modo geral, observa-se na Figura 8 que os algoritmos RD, FF, e MU, apesar de apresentarem desempenhos ligeiramente inferior aos dos algoritmos MS, RCL e MB, em razão da simplicidade de implementação, mostram-se mais vantajosos. Mesmo no caso de tráfego exponencial (Figura 9), evidencia-se uma vantagem na implementação dos algoritmos mais simples (com exceção do algoritmo RD que piora o desempenho se afastando do grupo). Podemos ainda destacar o algoritmo FF pela sua maior simplicidade com relação ao algoritmo MU e pelo seu melhor desempenho com relação ao algoritmo RD, sob tráfego exponencial.



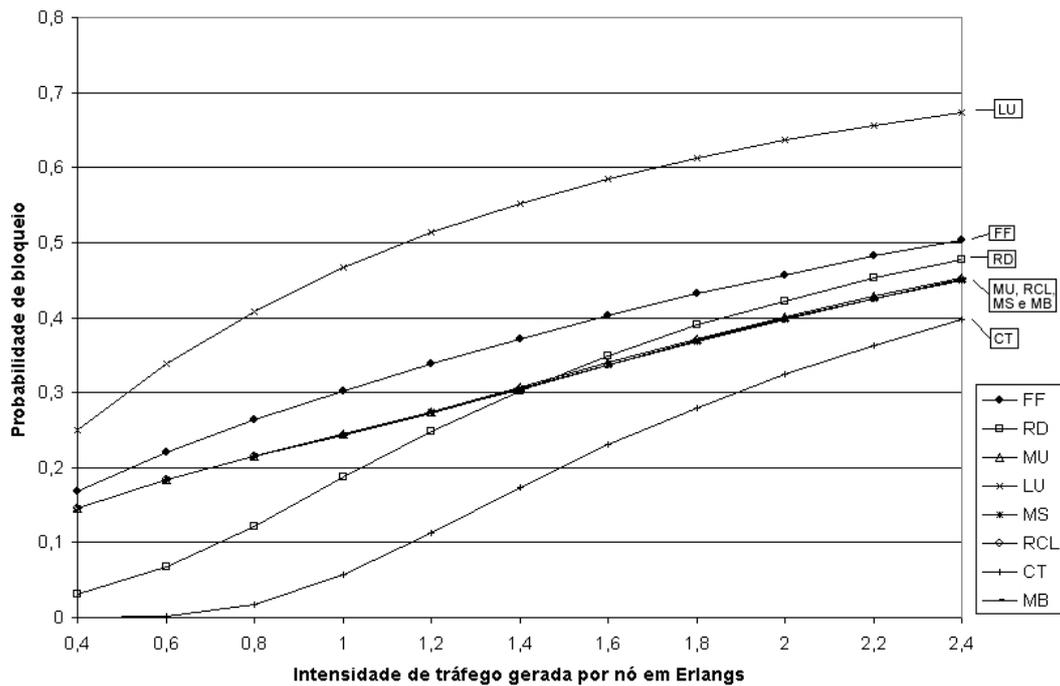
**Figura 8:** Anel óptico transparente unidirecional com 20 nós e 16 comprimentos de onda (tráfego uniforme e informações dos estados dos enlaces atualizadas).



**Figura 9:** Anel óptico transparente unidirecional com 20 nós e 16 comprimentos de onda (tráfego exponencial e informações dos estados dos enlaces atualizadas).

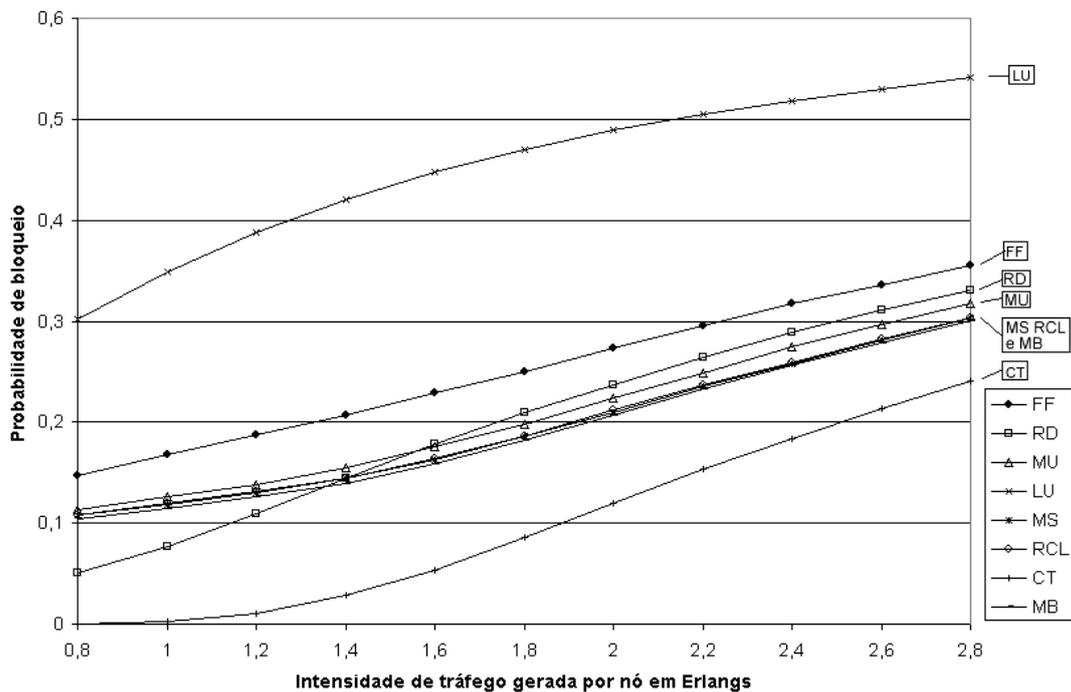
A Figura 10 mostra o desempenho de um anel óptico transparente unidirecional com 20 nós e 16 comprimentos de onda sob tráfego uniforme e com os estados dos enlaces atualizados em intervalos de tempo igual a  $(10\mu)^{-1}$  (escolhido por razões de simplicidade este valor representa um tempo de atualização equivalente a 1/10 do tempo de retenção das conexões).

A Figura 11 mostra o desempenho de um anel óptico transparente unidirecional com 20 nós e 16 comprimentos de onda sob tráfego exponencial e com os estados dos enlaces atualizados em intervalos de tempo igual a  $(10\mu)^{-1}$ .



**Figura 10: Anel óptico transparente unidirecional com 20 nós e 16 comprimentos de onda (tráfego uniforme e informações dos estados dos enlaces desatualizadas com atraso de  $(10\mu)^{-1}$ ).**

Observa-se tanto no caso do tráfego uniforme (Figura 10) quanto no de tráfego exponencial (Figura 11) que os algoritmos de maior complexidade (MS, RCL e MB), de modo geral, destacam-se em termos de um melhor desempenho do que o grupo dos algoritmos mais simples (LU, FF, RD e MU). O impacto das desatualizações de informações de estado de enlaces mostra que dentre os algoritmos que operam com informação global da rede, o LU que faz balanceamento de carga, é o mais afetado. Por outro lado, o algoritmo RD que balanceia carga e não depende de informação global da rede, é o menos afetado principalmente com tráfego menos intenso, onde apresenta inclusive melhor desempenho do que todos os outros algoritmos.



**Figura 11: Anel óptico transparente unidirecional com 20 nós e 16 comprimentos de onda (tráfego exponencial e informações dos estados dos enlaces desatualizadas com atraso de  $(10\mu)^{-1}$ ).**

## 5. Conclusão

O desenvolvimento de redes ópticas transparentes para compor a futura infra-estrutura de transporte dos *backbones* dos provedores de serviço de telecomunicações é uma tendência mundial. Os recursos básicos dessas redes são caminhos ópticos compostos de comprimentos de onda multiplexados em WDM nas fibras ópticas. Esses recursos devem suportar a oferta de uma gama variada de serviços de telecomunicações com um provisionamento dinâmico sob demanda e otimizado para um volume de tráfego crescente.

Os algoritmos de alocação de comprimento de onda aqui estudados constituem-se em instrumentos valiosos na otimização desses recursos. Principalmente quando a tecnologia de conversores de comprimento de onda ainda não está amadurecida e competitiva.

Neste estudo pôde-se observar num cenário particular (redes em anel) por exemplo, que a implementação de algoritmos mais simples como FF e o MU pode ser competitiva em termos de custo-desempenho. Foi identificado também que o impacto da desatualização das informações sobre os recursos da rede utilizados afeta negativamente o desempenho de todos os algoritmos de alocação de comprimento de onda estudados. O algoritmo LU que opera com informação global da rede, fazendo balanceamento de carga, foi o mais afetado. Por outro lado, o algoritmo RD que balanceia carga mas não depende de informação global da rede, além de ser menos afetado pela desatualização das informações dos estados da rede, apresenta, sob condições de tráfego menos intenso, desempenho melhor do que todos os outros algoritmos. Outros cenários de tráfego e de topologia (e.g., malha) estão sendo investigados atualmente com a finalidade de ampliar o conhecimento dos algoritmos RWA.

## Referências

- Barry, R. A. and Subramaniam, S. (1997). The max-sum wavelength assignment algorithm in wdm ring networks. In *OFC '97*.
- Chu, X., Li, B., and Chlamtac, I. (2003a). Wavelength converter placement under different rwa algorithms in wavelength-routed all optical networks. *IEEE TRANSACTION ON COMMUNICATIONS*, pages 607–617.
- Chu, X., Li, B., and Zhang, Z. (2003b). A dynamic rwa algorithm in a wavelength-routed all-optical network with wavelength converters. *IEEE Optical communications*.
- Giozza, W. F., Conforti, E., and Waldman, H. (1991). *Fibras Ópticas - Tecnologia e Projetos de Sistemas*. Makron/McGraw-Hill, 1th edition.
- Ramaswami, R. and Sivarajan, K. N. (1998). *Optical Network - A Practical Perspective*. Morgan Kaufmann Publishers.
- Soares, A. C. B. and Giozza, W. F. (2003). Controle de alocação de comprimento de onda e rotas em redes Ópticas transparentes. In *III Seminário Nacional de Controle e Automação*, pages 52–57.
- Soares, A. C. B., Neto, J. C. M., and Giozza, W. F. (2004). Simrwa: Uma ferramenta para avaliação de desempenho de algoritmos para alocação de comprimentos de onda e rotas em redes Ópticas transparentes. In *(aceito para publicação) III Salão de Ferramentas do SBRC*.
- Waldman, H., Campelo, D., and Camelo, R. (2000). Dynamic priority strategies for wavelength assignment in wdm rings. In *IEEE GLOBECOM 2000*, pages 1288–1292.
- Zang, H., Jue, J. P., and Mukherjee, B. (2000). A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical wdm network. *Optical Network Magazine*.
- Zhou, J. and Yuan, X. (2002). A study of dynamic routing and wavelength assignment with imprecise network state information. In *Parallel Processing Workshops, 2002*, pages 207 –213.