

Roteamento e Alocação de Comprimentos de Onda em Redes Ópticas Usando Algoritmo Genético

Marcos A.C. de Lima, Aluizio F.R. Araújo e Amílcar C. César

Resumo—O roteamento e alocação de comprimento de onda em redes ópticas WDM utilizando algoritmo genético (AG) são investigados neste artigo. A probabilidade de ocorrer bloqueio de requisição, causada por conflito entre comprimentos de onda em um caminho óptico, pode ser reduzida dotando alguns nós da rede com capacidade de conversão de comprimento de onda. Neste caso, a localização otimizada dos conversores é realizada pelo AG. Estratégias de roteamento dinâmico e fixo alternativo são consideradas. Resultados numéricos são obtidos por simulação de tráfego na rede NSFnet, demonstrando a potencialidade do uso do algoritmo proposto em gerenciamento de redes ópticas WDM.

Palavras-chave—comunicações ópticas, roteamento e alocação de comprimentos de onda, otimização, algoritmos genéticos.

Abstract—The routing and wavelength assignment in WDM networks using genetic algorithm (GA) are investigated in this paper. The request blocking probability, caused by conflict between different wavelengths within a same lightpath, can be reduced if some nodes in the network are able to execute wavelength conversion. In this case, the optimized converters placement is obtained through the proposed GA. Strategies of dynamic and fixed-alternate routing are considered. Numerical results, derived from simulation of traffic in the NSFnet, illustrated the capability of the proposed algorithm as a decision support tool in the management of WDM networks.

Keywords—optical communications, routing and wavelength assignment, optimization, genetic algorithms.

I. INTRODUÇÃO

O crescimento exponencial do tráfego da Internet observado nos últimos anos e a oferta de serviços que exigem faixa larga, como vídeo interativo, têm exercido enorme pressão sobre as redes de telecomunicações, tanto para ampliação da capacidade de transmissão quanto para a melhoria de desempenho. Embora grande parte desta demanda esteja sendo suprida pelas redes ópticas, os

equipamentos que empregam comutação eletrônica já estão atingindo o limite máximo possível. Uma das alternativas mais viáveis para a superar esta limitação é a utilização do esquema de multiplexação em comprimento de onda (WDM). Com ele é possível aproveitar a enorme largura de faixa das fibras ópticas. Desde então, a meta tecnológica mais atraente tem sido a substituição dos estágios de comutação eletrônica por outros de natureza puramente óptica, dando origem à rede totalmente óptica. Um dos elementos-chave na viabilização desta meta é o comutador puramente óptico (*optical cross-connect*, OXC), baseado principalmente em tecnologia MEMS (micro-eleto-mechanical-systems). A utilização destes componentes em núcleos de redes projetadas com base em comprimentos de onda as habilitam a manipular taxas agregadas da ordem de 2 Pbps [1].

Por outro lado, mesmo quando se trata do já amplamente empregado esquema WDM, o número de comprimentos de onda disponíveis para transporte de informações fica limitado à largura de faixa dos amplificadores ópticos utilizados nos enlaces das redes. Atualmente, os mais utilizados são aqueles baseados em fibra dopada e efeito Raman, podendo alcançar cerca de 20 dB de ganho de potência em largura de faixa de comprimento de onda de até 48 nm [2]. Amplas larguras de faixa podem ser alcançadas com o emprego de um ou mais comprimentos de onda de bombeio. Taxas agregadas de transmissão acima de 1 Tbps em longas distâncias têm sido alcançadas com o uso de WDM e amplificadores ópticos de faixa larga [3].

No início dos anos 1990, boa parte das pesquisas na área de comunicações ópticas estava concentrada em componentes para os sistemas WDM. A partir da segunda metade daquela década, devido ao progresso alcançado na melhoria do desempenho dos diversos componentes, ao aumento da demanda e à tendência de ampliação das redes, as pesquisas passaram dos sub-sistemas para as arquiteturas e desempenho das redes [4]. As redes roteadas por comprimento de onda passam a merecer atenção especial, em face da ampliação da capacidade de transmissão proporcionada pela adoção deste esquema.

Entretanto, com o crescimento e a interconexão de redes amplia-se a possibilidade de ocorrer bloqueios por causa de conflitos de comprimento de onda ao longo da rede. Mesmo empregando OXC e com capacidade de manipular altíssimas taxas de transmissão, as redes totalmente ópticas devem contar com técnica de conversão de comprimento de onda

Marcos A.C. de Lima, e-mail: mcardoso@sel.eesc.sc.usp.br, fone: 16-273-9366, ramal 225, fax: 16-2739372, é aluno do Programa de Doutorado em Eng. Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. Aluizio F.R. Araújo, e-mail: aluizioa@cin.ufpe.br, fone: 81-3271-8430, r. 4321, fax: 81-3271-8438 é docente do Centro de Informática, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE. Amílcar C. César, e-mail: amilcar@sel.eesc.sc.usp.br, fone: 55-16-273-9356 é docente do Depto. de Eng. Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. Marcos A.C. de Lima participa da premiação de melhor trabalho de estudante.

para reduzir significativamente a probabilidade de bloqueio [5]. O gerenciador da rede pode então decidir pela conversão de um dado comprimento de onda que chega em um nó em outro, sem interferir na informação transportada. O comprimento de onda que chegou ao nó receptor fica disponível para ser reutilizado.

Com o aumento da complexidade das redes, algoritmos eficientes e rápidos têm se tornado uma necessidade imperiosa no gerenciamento dos comprimentos de onda, sendo alvo de interesse de muitas pesquisas. Alocar capacidade de conversão em todos os nós da rede é, em muitos casos, opção antieconômica. Assim, algoritmos de gerenciamento devem responder também à questão crucial: quantos e em quais nós da rede os conversores precisam ser alocados para atender à demanda de tráfego e manter a rede economicamente viável?

Uma vez estabelecido um conjunto de demandas (solicitações de conexão), é preciso rotear cada demanda e atribuí-la um canal no sistema particular de transporte óptico. No caso, este canal atribuído é um comprimento de onda. Este processo é conhecido como alocação e roteamento de comprimento de onda (*RWA-routing and wavelength assignment*). O objetivo do RWA é alocar os recursos disponíveis para satisfazer da melhor maneira possível os requisitos impostos. RWA é um problema de otimização, tendo sido investigado a partir de várias abordagens [6]-[9].

As abordagens que utilizam algoritmos genéticos (AGs) têm apresentado resultados promissores na solução de problemas com múltiplas variáveis em sistemas dinâmicos. Os AGs são baseados em evolução das espécies, que incluem fenômenos como herança genética e seleção natural. Assim, pressupõe-se que uma solução potencial de um dado problema é um indivíduo, representado por um conjunto de parâmetros. O conjunto de indivíduos evoluirá até que soluções ótimas ou sub-ótimas sejam encontradas. Os AGs são processos não-lineares, formados a partir de eventos discretos e estocásticos de busca e otimização. Os AGs têm chamado atenção nos últimos tempos, principalmente pela facilidade de aplicação, robustez e capacidade de explorar de modo eficaz os espaços de solução. O uso de AG em redes ópticas tem sido investigado por vários autores [10], [11].

Neste artigo, o roteamento e alocação de comprimentos de onda em redes ópticas WDM são investigados com base em um algoritmo genético. Resultados numéricos obtidos a partir de simulação da rede NSFnet são apresentados. São adotados 8 comprimentos de onda por enlace com 5 rotas possíveis. Roteamento fixo alternativo e dinâmico são considerados. Um número máximo de 4 nós com conversão completa é determinado e fixado para efeito de comparação com resultados divulgados na literatura. Casos de rede com conversão completa e sem conversão são também simulados para efeito de comparação.

I. MODELO DE REDE ÓPTICA

Considerar uma rede de comunicação totalmente óptica na

qual cada nó da rede é composto por um roteador e um comutador óptico (OXC). Cada nó está conectado a outro por meio de um enlace WDM. Cada enlace dispõe de vários comprimentos de onda para alocar uma demanda. Uma rota é formada por enlaces sucessivos conectando os nós de origem e destino. Cada nó possui conhecimento completo dos recursos de toda a rede, tais como disponibilidade dos comprimentos de onda, comprimento dos enlaces e qualidade de transmissão em cada enlace. As solicitações de demanda devem ser atendidas dinamicamente, determinando-se uma rota através da rede, conectando o nó fonte ao destino e indicando os respectivos comprimentos de onda aos enlaces. A largura de banda total disponível no canal óptico é alocada durante todo tempo de permanência da conexão. O correspondente comprimento de onda não poderá ser alocado para qualquer outra conexão. Quando uma conexão for encerrada, sua rota associada será liberada, e todos os comprimentos de onda associados aos enlaces serão liberados, ficando disponíveis para nova utilização.

II. ALGORITMO GENÉTICO

O algoritmo genético é baseado em princípios evolutivos e consistem basicamente de fileiras de símbolos com tamanho fixo (*string*), que representam as possíveis funções ou estados do sistema. Na forma de representação mais simples, a informação consiste de símbolos binários. A terminologia e conceitos utilizados em algoritmos genéticos pode ser resumida conforme ilustra a Tabela 1.

TABELA 1. TERMINOLOGIA E CONCEITOS DE ALGORITMO GENÉTICO

Terminologia	Descrição
Gene	Elemento básico, parte de um cromossomo
Cromossomo	Seqüência de genes formando um componente do sistema
Indivíduo	Formado por um conjunto de cromossomos
População	Número de indivíduos em uma geração
Geração	Estágio iterativo da evolução das populações
Pais	Indivíduos selecionados para gerar descendentes
Descendentes	Indivíduos gerados a partir dos pais
Aptidão	Um dado valor indicativo de quanto um indivíduo está próximo do ótimo
Seleção	Operação em que indivíduos da população atual são escolhidos para integrar a nova população
Cruzamento	Operação em que se trocam genes entre dois indivíduos
Mutação	Operação em que se altera o valor de um ou mais genes
Política elitista	Garante ou dá prioridade à permanência dos indivíduos mais adaptados

No algoritmo proposto, o estado de cada comprimento de onda dos enlaces é representado por um gene. Um conjunto de genes forma um cromossomo, representando um enlace. O conjunto de todas os cromossomos forma o indivíduo que representa uma política por meio de um vetor de dimensão $D = E \times M$, no qual E é o número de enlaces e M é o número de comprimentos de onda, conforme ilustra a Figura 1. Cada gene ($j=1, \dots, M$) que forma um cromossomo representa o estado de um comprimento de onda (utilizado ou não-utilizado) em um enlace.

c_{11}	c_{12}	...	c_{1M}	c_{21}	c_{22}	...	c_{ij}	...	c_{N1}	c_{N2}	...	c_{NM}
----------	----------	-----	----------	----------	----------	-----	----------	-----	----------	----------	-----	----------

Figura 1. Representação de um indivíduo, formado por vários cromossomos ($i=1,\dots,N$).

A representação de cada gene é definida como

$$c_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{para o comprimento de onda } k \text{ em uso no enlace } i \\ 0, & \text{Para comprimento de onda que não está sendo usado.} \end{cases}$$

A função de aptidão total é calculada por:

$$fit_{tot} = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M fit(i,k), \quad (1)$$

na qual a função de aptidão de cada enlace é dada por:

$$fit_i(k) = n_1(k) \cdot r_1 + n_2(k) \cdot r_2 + n_3(k) \cdot r_3 + n_4(k) \cdot r_4. \quad (2)$$

Em (2), $n_1(k)$ é o número de comprimentos de onda disponíveis no enlace i , onde o comprimento de onda k não está em uso; $n_2(k)$ é o número de enlaces da rota i que estão utilizando o comprimento de onda k ; $n_3(k)$ é o comprimento do enlace; $n_4(k)$ é o número de bloqueios ao se designar o comprimento de onda k ; e r_1, r_2, r_3 e r_4 são constantes ponderadas de custo associadas às condições mencionadas e relacionadas a $n_1(k)$, $n_2(k)$, $n_3(k)$ e $n_4(k)$, respectivamente. As constantes de custo foram ordenadas por $r_1 > r_2 > r_3 > r_4$, para qual foi estabelecido de forma heurística que $r_1 = 1$, $r_2 = -2$, $r_3 = -3$ e $r_4 = -10$, penalizando desta forma as políticas que apresentem maior caminho, caminho mais congestionado, uso de conversores e um número maior de comprimentos de onda bloqueados.

A função de aptidão (2) determina a adequação, relativa à alocação, de cada comprimento de onda k para cada enlace. Particularmente, é o custo de se escolher o comprimento de onda k para atender à solicitação presente no enlace i . Para cada rota, o enlace é analisado e a disponibilidade de comprimentos de onda é verificada. Se em um dos enlaces da rota não existir nenhum comprimento de onda disponível a solicitação é bloqueada.

O AG proposto neste trabalho utiliza os operadores genéticos como seleção, cruzamento e mutação, juntamente com a estratégia de cruzamento em três pontos, política elitista e o mecanismo de inserção de imigrantes, compreendido como a inclusão de novos indivíduos à população. Para todos os casos investigados foi utilizada uma população composta por 25 indivíduos e realizadas 50 gerações. Uma política elitista para a seleção dos pais foi adotada, selecionando-se os melhores indivíduos da população com taxa de seleção de 20 %, aos quais foi aplicado o operador cruzamento, gerando 40 % de novos descendentes. O operador mutação foi aplicado em 20 % da população. A inserção de imigrantes à população foi incluída na proporção de 20 %.

III. ABORDAGEM DO PROBLEMA

A abordagem escolhida para este artigo baseia-se na alocação esparsa de conversores de comprimentos de onda. O uso de conversores em todos os nós torna a rede excessivamente cara e, em muitos casos, desnecessários, sem redução associada da probabilidade de bloqueio. Por este motivo, a distribuição dos conversores pelos nós da rede deve ser otimizado. Uma das soluções propostas para superar este inconveniente baseia-se na distribuição esparsa de conversores, dotando apenas alguns nós de capacidade de conversão de comprimento de onda [11]-[14].

O algoritmo genético proposto designa os comprimentos de onda às rotas, minimiza o número de conversões e a probabilidade de bloqueio, e determina a disposição otimizada dos conversores.

A. Casos-limites: Nós com e sem conversão

Para efeito de comparação de resultados de probabilidade de bloqueio foram adotados dois casos-limites: rede sem conversão e com conversão completa. Conversão completa significa que todos os nós são dotados de conversores, podendo cada um deles converter cada comprimento de onda em qualquer outro. Por outro lado, em rede sem conversão significa que nenhum nó é dotado de conversor de comprimento de onda. Conversão parcial é aquela para qual somente alguns nós são dotados de conversores (alocação esparsa), podendo cada um deles converter qualquer comprimento de onda em outro.

B. Disposição dos conversores de comprimento de onda

Para obter a disposição dos conversores foi utilizado o seguinte procedimento heurístico, adaptado das propostas de Vijayanand [11] e Xiao e Y. Leung [12]:

- Colocar os conversores nos nós que apresentam a maior utilização;
- Colocar os conversores nos nós com maior grau nodal;
- Colocar os conversores de tal forma que exista no mínimo um conversor em cada enlace;
- Colocar os conversores de tal forma que eles estejam espalhados pela rede (alocação esparsa).

C. Considerações e parâmetros de simulação

As considerações e parâmetros utilizados na simulação incluem:

- As solicitações de comprimentos de onda obedecem à distribuição de Poisson com médias uniformes entre os tempos de solicitações;
- A taxa média de solicitação de comprimento de onda é ξ ;
- O tempo de duração das solicitações (tempo de permanência da conexão) é dado por uma distribuição exponencial com duração média $1/\mu$;
- O tráfego oferecido, ρ_i , pelo par fonte-destino i é dado por $\rho_i = \xi_i/\mu$;
- Existem M comprimentos de onda disponíveis em

cada enlace, embora este possa ser diferenciado para cada enlace;

- f. As solicitações bloqueadas são eliminadas (Erlang-B).
g. O desempenho do algoritmo de alocação de comprimentos de onda para uma carga particular pode ser avaliado pela probabilidade de bloqueio, P_b , dada por:

$$P_b = \frac{\text{número de solicitações bloqueadas}}{\text{número de solicitações}}; \quad (3)$$

- h. O modelo de tráfego adotado é dinâmico, segundo o qual cada nó-fonte pode realizar solicitação de conexão aos demais nós (destino) de acordo com distribuição de Poisson.

O modelo genético pode ser resumido da seguinte forma:

- Iniciar variáveis
 - Ler a demanda de ocorrência de solicitações, $\xi(t)$
 - Gerar E populações de indivíduos
 - Calcular enquanto não houver convergência
 - Calcular a função aptidão para cada indivíduo
 - Escolher porcentagem de indivíduos mais aptos
 - Aplicar operadores genéticos
 - Selecionar indivíduos da próxima geração
 - Incrementar contador de gerações
 - Finalizar
 - Realizar o RWA definido pelo AG
 - Atualizar status do sistema
- Finalizar.

IV. RESULTADOS NUMÉRICOS

A rede NSFnet, mostrada na Figura 2, foi escolhida como exemplo de aplicação do algoritmo proposto por ser bastante utilizada como padrão de comparação [9]-[11]. Ela é constituída por 14 nós e 21 enlaces bidirecionais, tendo sido adotados 8 comprimentos de onda por enlace.

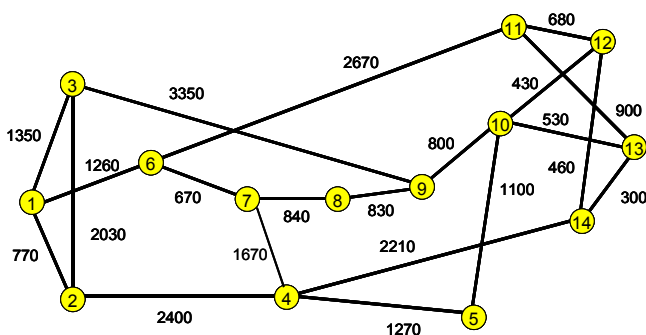


Figura 2. Rede NSFnet norte-americana constituída por 14 nós e 21 enlaces bidirecionais [9]-[11]. Distâncias em km. Ilustração fora de escala.

Nas simulações realizadas foi utilizado $1/\mu = 60$ segundos para o intervalo de tempo de conexão. A distribuição de tráfego gerada no par de nós fonte-destino é adotada uniforme com taxas 60, 70, 80, 90, 100, 110 e 120 solicitações por hora. A disposição dos conversores nos nós

obtida por Vijayanand [11] é simulada e utilizada para comparação de desempenho.

Inicialmente, as soluções representando as menores distâncias entre todos os possíveis pares fonte-destino são determinadas com o auxílio do algoritmo de Dijkstra [15]. Em seguida, o algoritmo do menor caminho alternativo [15] é empregado para calcular a probabilidade de bloqueio da rede em função do número de rotas utilizada nos conjuntos. A probabilidade de bloqueio da rede considerada é mostrada na Figura 3, considerando os casos limites sem conversão e com conversão completa de comprimentos de onda.

Os resultados apresentados na Figura 3 indicam que a adoção de conversores e várias rotas alternativas contribuem para a redução da probabilidade de bloqueio. Dentre as situações mostradas, aquela que utiliza conversão completa e 5 rotas alternativas exibe os menores valores de probabilidade de bloqueio para um determinado valor de tráfego oferecido. Como a adoção de conversores em todos os nós não é recomendada, estes resultados são indicados somente para comparação com a situação de alocação esparsa.

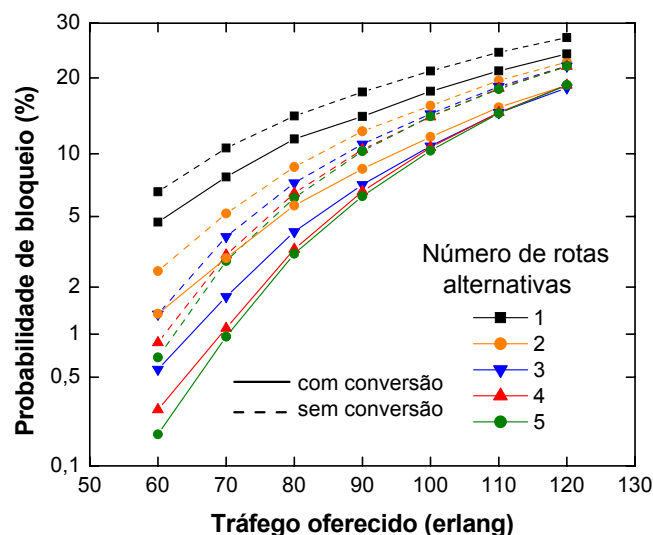


Figura 3. Probabilidade de bloqueio em função do tráfego oferecido na rede NSFnet considerando 8 comprimentos de onda por enlace. A parametrização é feita pelo número de rotas possíveis para cada par fonte-destino. Rede sem conversão (linha tracejada); rede com conversão completa (linha contínua).

A Figura 4 mostra os resultados obtidos em situação de alocação esparsa de conversores e a Tabela 2 exibe os valores numéricos correspondentes. Foram adotadas 2 disposições distintas para 4 nós com conversores. A quantidade de nós com conversores foi escolhida para que os resultados pudessem ser comparados com as disposições sugeridas por Vijayanand [11]. Os casos-limites com conversão completa e sem conversão são mostrados para efeito de comparação. Pode-se observar que as 2 disposições esparsas de conversores apresentam desempenhos similares, exibindo valores de probabilidade de bloqueio inferiores ao obtido por Vijayanand [11], para valores de tráfego oferecido até quase 100 erlangs. Um aspecto a ser observado no algoritmo proposto por Vijayanand [11] é a dependência da distribuição

dos conversores com a demanda de tráfego (ver Tabela 2). Esta condição dificulta a aplicação do algoritmo em ambientes que apresentam freqüentes variações de demanda. O AG proposto neste trabalho apresenta uma melhoria de desempenho da rede para uma extensa faixa de demanda, utilizando um número fixo de nós equipados com conversão completa.

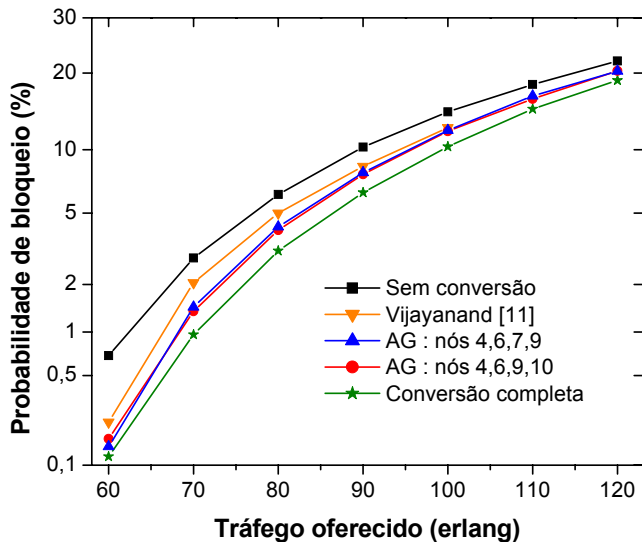


Figura 4. Probabilidade de bloqueio em função do tráfego oferecido para a rede NSFnet considerando roteamento alternativo com 5 rotas possíveis e 8 comprimentos de onda por enlace. Resultados obtidos por Vijayanand [11] são também mostrados para efeito de comparação.

Os resultados apresentados na Tabela 2 ilustram que a estratégia AG proposta neste trabalho apresenta melhor desempenho que o obtido por Vijayanand [11]. Por exemplo, para um tráfego igual a 70 erlangs, as probabilidades de bloqueio para os dois casos são 1,3652% e 2,0488%. Para um tráfego de 80 erlangs, estes valores são 4,0740% e 4,9988%. Estes resultados demonstram, respectivamente, uma redução no número de chamadas bloqueadas para o AG proposto em 33% e 18% em relação ao esquema de Vijayanand [11]. Para demandas de tráfego superiores a 100 erlangs, Vijayanand [11] não obtém melhoria satisfatória com a inclusão dos conversores e adota uma rede sem conversão.

TABELA 2. PROBABILIDADE DE BLOQUEIO NA REDE NSFNET: COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DO AG PROPOSTO E DE VIJAYANAND [11].

Tráfego (erlang)	Probabilidade de bloqueio (%)					
	Sem conversão	Conversão Completa	Vijayanand [11]	Nós [11]	AG (este trabalho)	
					Nós	
				4;6;7;9	4; 6; 9;10	
60	0,6924	0,1179	0,2235	4;7;11	0,1424	0,1646
70	2,8584	0,9613	2,0488	3;7;11;12	1,4519	1,3652
80	6,2087	3,1389	4,9988	3;4;11;12	4,2400	4,0740
90	10,2736	6,3466	8,4395	7;9;10	7,9001	7,7583
100	14,3581	10,3298	12,4182	7;10;11;12	12,1086	11,9989
110	18,2222	14,7514	18,2222	-----	16,5241	16,1078
120	21,9887	18,8493	21,9887	-----	20,3202	20,3562

Também foi implementado para a rede NSFnet um AG para o estabelecimento dinâmico das conexões. O algoritmo genético utiliza as informações do estado atual do ambiente

para determinar dinamicamente as rotas e os respectivos comprimentos de onda. Esta forma de roteamento permite considerar, além dos aspectos físicos da rede e disponibilidade dos comprimentos de onda, a possibilidade do encaminhamento da informação em termos da qualidade do sinal. Na Figura 5 são apresentados os resultados obtidos por simulação para probabilidade de bloqueio da rede NSFnet para os dois modelos de AG propostos utilizando roteamento fixo alternativo, com 5 rotas possíveis, e roteamento dinâmico. Os resultados obtidos no modelo anterior, para roteamento alternado utilizando AG com 5 possíveis rotas, foram incluídos para efeito de comparação. A Tabela 3 exhibe os valores numéricos correspondentes.

Para a rede NSFnet, cujo grau nodal médio é igual a 3,0, o uso do roteamento alternativo com 5 rotas apresenta praticamente todas as soluções de rotas possíveis para todos os pares fonte-destino. Enquanto o AG alternativo utiliza as rotas previamente definidas, o AG dinâmico deve encontrar a rota e os respectivos comprimentos de onda no mesmo intervalo de tempo.

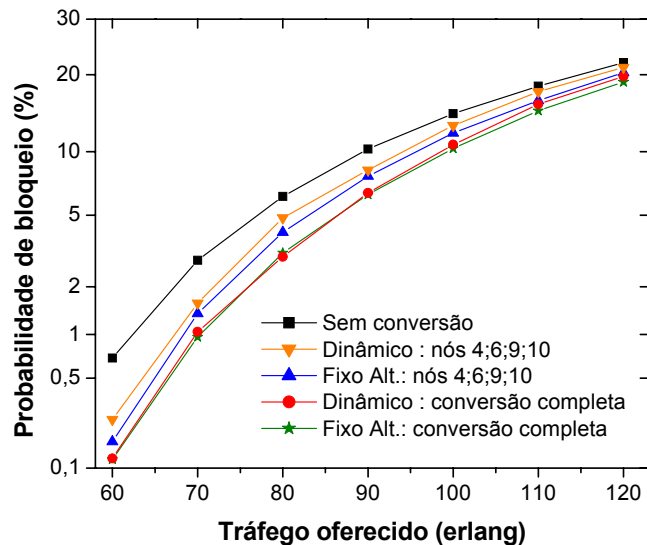


Figura 5. Probabilidade de bloqueio em função do tráfego oferecido, para a rede NSFnet considerando roteamento alternativo e dinâmico, com 8 comprimentos de onda por enlace.

TABELA 3. PROBABILIDADE DE BLOQUEIO NA REDE NSFNET : COMPARAÇÃO ENTRE ROTEAMENTOS FIXO ALTERNATIVO E DINÂMICO.

Tráfego (erlang)	Probabilidade de bloqueio (%)					
	Sem conversão	Roteamento Fixo Alternativo		Roteamento Dinâmico		
		Conversão Completa	Nós		Conversão completa	Nós
			4; 6; 9; 10			
60	0,6924	0,1179	0,1646		0,1203	0,2458
70	2,8584	0,9613	1,3652		1,0401	1,5893
80	6,2087	3,1389	4,074		2,9902	4,8495
90	10,2736	6,3466	7,7583		6,4622	8,2765
100	14,3581	10,3298	11,9989		10,7269	12,8796
110	18,2222	14,7514	16,1078		15,6257	17,3917
120	21,9887	18,8493	20,3562		19,7369	21,1987

Embora o AG aplicado ao sistema de roteamento dinâmico tenha apresentado resultados ligeiramente inferiores aos do

roteamento alternativo, as vantagens deste algoritmo se destacam em redes com grande número de conexões que apresente variações na topologia, como falha de operação em alguns nós roteadores. Nestes casos, o AG dispõe de liberdade para avaliar todas as possibilidades existentes antes de realizar o roteamento.

A Tabela 4 mostra o tempo médio de atendimento de requisição de comprimento de onda em função do tráfego total oferecido. A cada segundo o programa verifica as novas requisições, determina a melhor rota e os respectivos comprimentos de onda e estabelece a conexão. Os tempos de processamento obtidos com o AG são satisfatórios. No roteamento fixo, para atender a cada uma nova requisição, o AG necessita em média de apenas 14,7 milissegundos. No roteamento dinâmico, estimando-se as vantagens deste algoritmo em determinadas configurações, o tempo necessário para o processamento pode ser considerado pequeno. Na rede NSFnet, para 120 erlangs o AG consegue estabelecer as conexões em um período inferior a 150 milissegundos.

As simulações foram realizadas em microcomputador com processador Pentium IV, 2,2 GHz de frequência de clock, 512 MB de memória RAM e plataforma Microsoft Windows XP.

TABELA 4. TEMPO DE ATENDIMENTO DE REQUISIÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA EM FUNÇÃO DO TRÁFEGO

Tempo de atendimento de requisição (milissegundos)				
Tráfego (erlang)	Roteamento fixo alternativo ⁽¹⁾		Roteamento dinâmico ⁽²⁾	
	Tempo por requisição	(tempo por requisição) x (tráfego) ⁽³⁾	Tempo por Requisição	(tempo por requisição) x (tráfego) ⁽³⁾
60	15,013	15,013	40,990	40,990
70	14,893	17,375	44,581	52,011
80	15,159	20,212	48,692	64,922
90	14,533	21,800	53,448	80,173
100	14,677	24,462	57,488	95,813
110	14,767	27,072	62,862	115,247
120	14,407	28,815	66,901	133,803

⁽¹⁾ 5 rotas, 25 indivíduos, 50 gerações, 4 conversores de λ ; ⁽²⁾ 50 indivíduos, 50 Gerações, 4 conversores de λ ; ⁽³⁾ tempo necessário para atender todas as requisições em período de 1 segundo.

V. CONCLUSÕES

O roteamento e alocação de comprimentos de onda em redes ópticas WDM foram investigados com base em algoritmos genéticos. Resultados numéricos obtidos a partir de simulação da rede NSFnet foram apresentados, considerando roteamentos fixo alternativo e dinâmico. Um número máximo de 4 nós com conversão completa foi determinado e fixado para efeito de comparação com resultados divulgados na literatura. Redes sem conversão e com conversão completa foram também simuladas para efeito de comparação. Nos resultados apresentados para a rede NSFnet pode-se observar que a distribuição otimizada dos conversores de comprimento de onda obtida com o AG proposto resultou em melhoria significativa no desempenho

do sistema. A otimização obteve distribuição única para os conversores em todas as situações de demanda de tráfego.

Os resultados de simulação revelam melhoria significativa em termos de economia nos custos dos equipamentos pode ser obtida por meio dos algoritmos genéticos, aumentando ou reduzindo o número de conversores na rede.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pelo apoio parcial a esta pesquisa sob a forma de bolsa de estudos de doutorado (proc. no. 00/9180-1).

REFERÊNCIAS

- [1] D. J. Bishop, C. R. Giles e G. P. Austin, "The Lucent lambdaRouter: MEMS tecnologia of the future here today", *IEEE Communications Magazine*, pp.75-79, março de 2002.
- [2] "Raman amplification design in WDM systems", *Web Proforum Tutorials, The International Engineering Consortium*, www.iec.org, último acesso em 3 de abril de 2003.
- [3] S. Banedee, A. Agarwal, D. E. Grosz, A. Kung, D. N. Maywar, M. Movassaghi, T. H. Wood, "Long-haul 64x40 Gbit/s DWDM transmission over commercial fibre types with large operating margins", *IEEE Electronics Letters*, vol. 39, no. 1, pp. 92-94, 9 de janeiro de 2003.
- [4] C. Qiao, D. Datta, G. Ellinas, A. Gladish, E. Modiano e J. Hayes, "Guest editorial: WDM-based network architectures", *IEEE J. on Selected Areas in Commun.*, pp. 1-3, vol. 20, no. 1, janeiro de 2002.
- [5] J. Strand, R. Doverspike e G. Li, "Importance of wavelength conversion in an optical network", *Optical Networks Magazine*, pp. 33-43, maio/junho de 2001.
- [6] K. G. Ramakrishnan e M. A. Rodrigues, "Optimal routing in shortest-path data networks", *Bell Labs Tech. J.*, pp. 117-137, janeiro-junho de 2001.
- [7] B. Chen e J. Wang, "Efficient routing and wavelength assignment for multicast in WDM networks", *IEEE J. on Selected Areas in Commun.*, pp. 97-109, vol. 20, no. 1, janeiro de 2002.
- [8] H. Harai, M. Murata e H. Miyara, "Heuristic algorithm for allocation of wavelength convertible nodes and routing coordination in all-optical networks", *J. Lighthwave Technol.*, pp. 535-545, vol. 17, no. 4, abril de 1999.
- [9] L. Li and A. K. Somani, "Dynamic wavelength routing using congestion and neighborhood information", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 7, no. 5, pp. 779-786, outubro de 1999.
- [10] D. Saha, M. D. Purkayastha and A. Mukherjee, "An approach to wide area WDM optical network design using genetic algorithm", *Computer Communications*, vol. 22, no. 2, pp. 156-172, janeiro de 1999.
- [11] C. Vijayanand, M. S. Kumar, K. R. Venugopal and P. S. Kumar, "Converter placement in all-optical networks using genetic algorithms", *Computer Communications*, vol. 23, pp. 1223-1234, 2000.
- [12] G. Xiao and Y. Leung, "Algorithms for allocating wavelength converters in all-optical networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 7, no. 4, pp. 545-557, agosto de 1999.
- [13] S. Subramaniam, M. Azizoglu and A. K. Somani, "On optimal converter placement in wavelength-routed networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 7, no. 5, pp. 754-766, outubro de 1999.
- [14] S. Subramaniam, M. Azizoglu and A. K. Somani, "All-optical networks with sparse wavelength conversion", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 4, no. 4, pp. 544-557, agosto de 1996.
- [15] D. Bertsimas and J. N. Tsitsiklis, *Introduction to Linear Optimization*. Massachusetts: Athena Scientific, 1997, p. 587.
- [16] S. Ramamurthy and B. Mukherjee, "Fixed-alternate routing and wavelength conversion in wavelength-routed optical networks," *Proceedings IEEE GLOBECOM'98*, Sydney, Australia, pp. 2295-2303, 1998.