

Agregação Dinâmica de Tráfego em Redes Ópticas WDM sob Impacto de ASE e PMD utilizando Algoritmo Genético

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

Resumo— Um algoritmo genético (AG) para agregação (*grooming*) de tráfego dinâmico em rede óptica WDM é apresentado. O AG ajusta as conexões aos nós, determina uma adequada distribuição esparsa dos recursos da rede, estabelece imparcialidade (*fairness*) de capacidade por meio de controle de admissão de conexão (CAC), e mantém a probabilidade de bloqueio global em nível aceitável. Adicionalmente, os impactos da dispersão por polarização modal (PMD) e da emissão espontânea amplificada (ASE) no desempenho da rede são investigados. Os resultados numéricos, obtidos por meio de simulação de tráfego na rede italiana de faixa larga, mostram a aplicabilidade do algoritmo para uso em redes WDM.

Palavras-chave— Rede óptica WDM, RWA, tráfego dinâmico, agregação de tráfego (*grooming*), imparcialidade (*fairness*) de capacidade, restrições da camada física (*impairments*), PMD, ASE, otimização, algoritmo genético.

Abstract— A genetic algorithm (GA) for dynamic traffic grooming in WDM network is presented. The GA adjusts the connections to the nodes, determines the optimal allocation of network resources, establishes capacity fairness by means of connection admission control (CAC), and keeps an adequate level for the global blocking probability. Additionally, the impact of two transmission impairments on the performance of the network is investigated. They are the polarization mode dispersion (PMD) and the amplified spontaneous emission (ASE). Numerical results, obtained by means of traffic simulation in the topology of the wideband Italian network, show the potentiality of the algorithm designed for WDM network management.

Keywords—WDM networks, RWA, dynamic traffic, grooming, fairness, transmission impairments, ASE, PMD, optimization, genetic algorithm.

I. INTRODUÇÃO

O aumento do tráfego, principalmente oriundo da Internet, o oferecimento de serviços faixa larga, como vídeo interativo, e a migração para a camada óptica de diversas funcionalidades, como roteamento e agregação de tráfego, têm exigido a adoção de técnicas que ampliem a eficiência das redes ópticas que empregam multiplexação por divisão em comprimento de onda (WDM— *wavelength division*

multiplexing). A técnica de rotear tráfego por meio de comprimentos de onda tem sido uma das alternativas mais viáveis. De acordo com ela, vários comprimentos de onda ficam disponíveis para seleção e estabelecimento de conexão entre os nós da rede.

O procedimento de selecionar comprimentos de onda e estabelecer um caminho óptico (*lightpath*) entre os nós fonte e destino é conhecido por *roteamento e alocação de comprimento de onda* (RWA— *routing and wavelength assignment*). Em uma rede óptica, podem causar bloqueio de solicitações de conexão o uso de um único comprimento de onda em todos os enlaces de um caminho óptico (restrição de comprimento de onda) e de uma quantidade de comprimentos de onda menor do que a necessária para atender a todas as solicitações. Sendo assim, o uso de dispositivos capazes de realizar conversão de comprimento de onda contribui para a redução significativa da probabilidade de bloqueio de solicitações [1]. Entretanto, a alocação esparsa de nós com capacidade de conversão de comprimento de onda é necessidade imperativa, tanto do ponto de vista tecnológico quanto econômico. Deste modo, algoritmos eficientes de roteamento e alocação de comprimento de onda são exigência crucial para tornar as redes técnica e economicamente viáveis.

Por outro lado, as novas funcionalidades da camada óptica incluem a agregação (*grooming*) de tráfego, composto por diferentes solicitações de capacidade de largura de faixa [2], e imparcialidade (*fairness*) de capacidade, pois as solicitações que demandam frações maiores de capacidade estão sujeitas a probabilidade de bloqueio mais elevada.

Esquemas combinando as duas técnicas, agregação de tráfego e imparcialidade de capacidade, podem ser utilizados em conjunto com algoritmos de roteamento e alocação de comprimento de onda com intuito de reduzir a probabilidade de bloqueio de solicitações de conexão. Thiagarajan e Somani [3] propuseram um esquema de controle de admissão de conexão (CAC) utilizando agregação de tráfego com base em dois tipos de nós de rede: seletivos em comprimento de onda (WSXG— *wavelength selective crossconnect*) e com agregação em comprimento de onda (WGXC— *wavelength grooming crossconnect*). Quanto à topologia física das redes, não obstante o uso de diversas técnicas, grande parte dos problemas de agregação de tráfego investigados utilizam redes em anel [2], [3], mas as topologias arbitrárias também começam a ser focalizadas [4].

Adicionalmente, o impacto sobre o desempenho de redes ópticas, causado por restrições da camada física

Marcos A.C. Lima e Amílcar C. César, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Depto. Eng. Elétrica, São Carlos, SP. Aluizio F.R. Araújo, Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Informática, Recife, PE. E-mails: mcardoso@sel.eesc.usp.br; aluizioa@cin.ufpe.br; amilcar@sel.eesc.usp.br.

(*impairments*), oriundas de dispositivos e fibra óptica, deve ser considerado nos algoritmos de roteamento em redes WDM transparentes, conforme têm demonstrado pesquisas recentes [5]-[7]. Duas destas limitações são a emissão espontânea amplificada (ASE— *amplified spontaneous emission*) e a dispersão por polarização modal (PMD— *polarization mode dispersion*) [5]. Afetadas por elas, uma rede óptica WDM abrangendo grande área geográfica pode exibir caminhos ópticos com características de transmissão abaixo do aceitável. Se este for o caso, algum esquema da regeneração deve ser acrescentado aos trajetos. Se dispositivos de regeneração óptico-eletrônico-óptico (O-E-O) forem empregados, a arquitetura de rede deixa de ser transparente e passa a ser opaca [6].

RWAs são problemas de otimização e várias abordagens heurísticas foram propostas para resolvê-los [8], [9]. As abordagens baseadas em algoritmos genéticos (AG) têm sido empregadas para solucionar problemas para os quais as soluções heurísticas não são possíveis ou conduzem freqüentemente a resultados insatisfatórios [10]-[12]. O AG é uma técnica de otimização inspirada na teoria da evolução pela seleção natural proposta por Darwin, sendo capaz de resolver de forma eficaz problemas NP-completos com múltiplas restrições. O uso de AG demanda poucas exigências: um mapeamento entre o espaço de busca e os cromossomos, um conjunto de operadores genéticos e uma função de avaliação. As soluções ótimas ou sub-ótimas são obtidas entre os descendentes dos indivíduos mais adaptados, de tal forma que seus atributos tendem a ser preservados nas gerações seguintes [10].

Neste trabalho, um algoritmo RWA heurístico baseado em AG com objetivo de reduzir a probabilidade de bloqueio global das solicitações de conexão em redes ópticas é proposto. O algoritmo utiliza nós roteadores com características semelhantes às propostas em [3], realiza agregação de tráfego e imparcialidade de capacidade de largura de faixa, utiliza controle de admissão de conexão, além de estender a abordagem feita por Thiagarajan e Somani [3] incluindo as restrições de camada física oriundas de ASE e PMD. As simulações foram realizadas considerando a topologia da rede italiana de faixa larga sob tráfego dinâmico. Os resultados numéricos mostram desempenho promissor da abordagem aqui proposta.

II. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A. Modelo dos Nós da Rede

Thiagarajan e Somani [3] definem agregação de tráfego em redes WDM como o procedimento de multiplexar, demultiplexar e comutar tráfego composto por distintas capacidades de largura de faixa em canais ópticos de alta capacidade. A tarefa de multiplexar e demultiplexar as taxas de tráfego em comprimentos de onda pode ser executada por multiplexador óptico *add/drop* (OADM— *optical add/drop multiplexer*), enquanto a ação de comutar as taxas de tráfego de um comprimento de onda para outro pode ser executada por comutador óptico (OXC— *optical crossconnect*).

A rede óptica a ser investigada é dotada de dois tipos de nós [3]: WSXC e WGXC. Os nós WSXC possuem OXC e OADM. O OXC executa comutação espacial completa de comprimentos de onda entre uma porta de entrada e uma porta de saída, enquanto o OADM agrega os fluxos de tráfego nos comprimentos de onda. Entretanto, os nós WSXC executam agregação restrita, pois não podem comutar fluxos de tráfego entre comprimentos de onda. Os nós WGXC, além de possuírem a funcionalidade de um WSXC, são capazes de comutar fluxos de tráfego de um comprimento de onda presente em uma porta de entrada para um outro comprimento de onda em uma porta de saída. Esta comutação é suposta inteiramente livre de bloqueios e pode ser executada para todos os comprimentos de onda de todas as portas de entrada para qualquer porta de saída. A complexidade e custo do equipamento de um nó WGXC são maiores que a do nó WSXC. Conseqüentemente, consideramos a situação prática para qual somente alguns nós da rede são do tipo WGXC e o restante dos nós, WSXC. Tal rede é definida como rede com agregação esparsa. Por outro lado, uma rede com apenas nós WSXC é definida como rede com agregação restrita [3].

As solicitações de tráfego não podem ser divididas entre comprimentos de onda diferentes. Consideramos ainda que existem vários OADMs, isto é, receptores e transmissores nos nós em número suficiente para assegurar atendimento a todo tráfego originado. Deste modo, o tráfego de um nó é limitado pelo grau do nó, pelo número de comprimento de onda nas fibras e pela capacidade dos comprimentos de onda.

B. Imparcialidade de Capacidade e Controle de Admissão de Conexão

Algumas solicitações podem exigir uma conexão de tráfego com taxas de transmissão menores que a capacidade máxima. O bloqueio destas solicitações é proporcional à demanda de capacidade do comprimento de onda. A relação de imparcialidade de capacidade, F_r , é a relação entre a probabilidade de bloqueio por unidade de taxa de transmissão para a solicitação de maior taxa, \hat{p}_g , e a solicitação de menor taxa, \hat{p}_1 , ou [3]:

$$F_r = \frac{\hat{p}_g}{\hat{p}_1}, \quad (1)$$

Se o valor de F_r for maior que 1, o algoritmo favorece as solicitações com taxas maiores em relação àquelas com taxas menores, e vice-versa. Se F_r for próximo de 1, significa que o algoritmo consegue estabelecer a imparcialidade na capacidade de rede.

O CAC é definido como um conjunto de decisões a serem tomadas para estabelecer se uma solicitação de conexão será aceita ou rejeitada. Os mecanismos de CAC podem ser usados conjuntamente com os esquemas RWAs para estabelecer imparcialidade entre as diversas solicitações em detrimento da probabilidade de bloqueio global. O procedimento de CAC determina aceitar uma chamada com capacidade j se $(\hat{p}_j \geq \hat{p})$ e rejeitar uma chamada com probabilidade $(\hat{p} - \hat{p}_j) / \hat{p}$, na

qual \hat{P} é a probabilidade de bloqueio global por unidade de taxa de transmissão.

III. CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS (PMD) E AMPLIFICADORES ÓPTICOS (ASE)

As duas restrições da camada física investigadas neste trabalho são a PMD e a ASE.

A. Dispersão por Polarização Modal (PMD)

A propagação de onda eletromagnética em uma fibra óptica monomodo exibe dois modos de polarização ortogonais. Quando o núcleo da fibra é assimétrico, as componentes se propagam com velocidades distintas, provocando o alargamento do pulso original. A restrição devido ao atraso médio diferencial entre dois estados de polarização ortogonais pode ser expressa por [5]:

$$\sqrt{\sum_{k=1}^{M_C} [B(k)]^2 [D_{PMD}(k)]^2 L(k)} < a(k), \quad (2)$$

na qual $a(k)$ é uma fração da duração do bit; $B(k)$ é a taxa de bits; $D_{PMD}(k)$ é o parâmetro PMD da fibra, em ps/\sqrt{km} ; M_C é o número de lances (distância entre dois compensadores de PMD) presentes em uma rota; $L(k)$ é o comprimento do lance, em km; e k representa o k -th lance. Valor típico de $a(k)$ é 0,1 em todos os lances. O valor típico do parâmetro PMD está entre 0,2 e 0,5 ps/\sqrt{km} . Entretanto, as fibras fabricadas recentemente podem exibir valores bem menores, na faixa de 0,05 a 0,1 ps/\sqrt{km} [5]. Os valores dos parâmetros da camada física são considerados não estando sujeitos a variações abruptas.

B. Emissão Espontânea Amplificada (ASE)

Em um amplificador óptico ocorre contribuição de ruído por causa de fótons gerados espontaneamente. A ASE degrada a relação sinal-ruído (SNR— *signal noise ratio*) e, conseqüentemente, impõe um limite ao comprimento do lance entre transmissor e receptor. Se há M_A amplificadores ao longo do caminho óptico, o número máximo de lances entre os amplificadores é dado por [5]:

$$M_A \leq \left\lceil \frac{P_L}{2SNR_{\min} n_{sp} h\nu (G-1)B_0} \right\rceil, \quad (3)$$

na qual P_L é a potência óptica média lançada no transmissor, SNR_{\min} é o nível mínimo de SNR aceitável, n_{sp} é o fator de emissão espontânea, $h = 6,63 \cdot 10^{-34} J/Hz$ é a constante de Planck, ν é a frequência da portadora, G é o ganho de potência do amplificador e B_0 é a largura de faixa óptica.

IV. ROTEAMENTO E ALOCAÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA

Os objetivos do RWA são: 1) maximizar o desempenho da rede para um dado conjunto de recursos; 2) atender a todas as

solicitações de tráfego; 3) minimizar a função custo total da rede, determinada pela utilização dos comprimentos de onda e dos equipamentos de rede como aqueles que compõem os nós WSXC e WGXC, amplificadores e compensadores de PMD; e 4) garantir a integridade do sinal óptico sujeito às restrições da camada física. Em geral, existem quatro operações possíveis para estabelecer o tráfego entre os nós fonte e destino sem alterar os enlaces existentes: rotear o tráfego em um ou em múltiplos caminhos ópticos já alocados; habilitar um ou mais novos caminhos ópticos conectando o nó fonte ao nó destino.

O problema de RWA pode ser dividido em dois subproblemas: 1) escolher a posição dos nós equipados com capacidade WSXC/WGXC e com compensadores de PMD; e 2) determinar a rota com respectivo comprimento de onda para cada solicitação de conexão. Atualmente, dispositivos totalmente ópticos equivalentes aos nós WSXC/WGXC não estão disponíveis e, portanto, será adotada a agregação eletrônica de tráfego. Ocorrendo este processo, o sinal será regenerado, compensando a degradação causada pela PMD e ASE. Assim, o objetivo é determinar as posições apropriadas para os nós WSXC e WGXC tais que a probabilidade de bloqueio, o número de regenerações O-E-O e o custo da rede sejam minimizados.

Consideremos uma dada distribuição de tráfego e uma rede com capacidade de c caminhos ópticos. O problema consiste em determinar uma topologia virtual com o menor número de caminhos ópticos e distribuir cada fluxo de tráfego nestes caminhos ópticos. Estas funções estão sujeitas às seguintes restrições [2]: 1) de roteamento de caminho óptico; 2) de alocação de comprimento de onda ao caminho óptico; e 3) de roteamento de tráfego. A formulação deste sistema representa um problema de programação linear inteira com $O(n^4)$ variáveis, cuja solução se torna impraticável, mesmo para redes de dimensões moderadas [13]. Os problemas de agregação de tráfego podem ser representados por uma combinação entre um problema de programação linear inteira e um problema de grafo, sendo tipicamente NP-completo [14]. Eles devem ser resolvidos por meio de técnicas heurísticas [15], [16] para se obter soluções adequadas em um intervalo de tempo razoável.

V. ALGORITMO GENÉTICO

No modelo proposto, cada gene, (c_{ijk}) , representa em forma binária um estado do comprimento de onda. O conjunto de genes forma um cromossomo, (l_i) . Esta condição representa o estado do comprimento de onda dos enlaces para cada nó particular, (w_j) . O conjunto de todos os comprimentos de onda compõe um indivíduo, $(l_1, \dots, l_i, \dots, l_L)$, representando uma política. No sistema há L enlaces unidirecionais, cada um com W comprimentos de onda, os quais podem ter sua capacidade plena de largura de faixa subdividida em g partes (*granularity*). Cada indivíduo é denotado por um vetor de dimensão $C = L \times W \times g$, conforme mostra a Tabela 1.

TABELA 1. REPRESENTAÇÃO DA POLÍTICA DO SISTEMA

L_1						...	L_L					
w_1			w_w			...	w_1			w_w		
c_{111}	...	c_{11g}	c_{1w1}	...	c_{1wg}	...	c_{L11}	...	c_{L1g}	c_{Lw1}	...	c_{Lwg}

na qual

$$c_{ijk} = \begin{cases} 1 & , \text{ se o fluxo de tráfego } k \text{ no comprimento de onda } j \\ & \text{ estiver em uso no caminho } i; \\ 0 & , \text{ caso contrário.} \end{cases}$$

O algoritmo genético procura uma política que otimiza o desempenho do sistema. O AG proposto usa os operadores genéticos convencionais (seleção, cruzamento e mutação), juntamente com a estratégia de cruzamento em três pontos, política elitista e o mecanismo de inserção de imigrantes [10], este compreendido como a inclusão de novos indivíduos à população. Para todos os casos investigados foi utilizada uma população composta por 25 indivíduos e 50 gerações. Foi adotada uma política elitista para a seleção dos pais, de tal forma que os melhores indivíduos da população são selecionados com taxa de 20%, aos quais foi aplicado cruzamento, gerando 40% de novos descendentes. Mutação foi aplicada em 20% da população e inserção de imigrantes na proporção de 20%. Estes valores foram escolhidos após inúmeras simulações.

O algoritmo calcula a função custo associada à rota, entendida como a soma dos custos individuais devido ao uso do comprimento de onda, dos nós WSXC e WGXC, dos amplificadores e do enlace. O uso de um comprimento de onda diminui a largura de faixa disponível, aumentando o potencial de bloqueio das solicitações futuras, enquanto o uso de um amplificador introduz distorção que degrada a relação sinal-ruído. A dispersão por polarização modal é proporcional ao comprimento do enlace. O custo do transceptor inclui o custo do equipamento terminal, assim como o do equipamento que realiza o processamento eletrônico.

Função de aptidão

A função de aptidão estima a adequação de cada indivíduo ao ambiente com respeito ao objetivo. O cálculo da função de aptidão considera diferentes variáveis envolvidas no RWA para estabelecer o maior número de solicitações de forma otimizada, considerando o estado atual do sistema e o custo da rede. Para o sistema atual, a função de aptidão global é dada por

$$fit_{tot} = \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^W fit(i, k), \quad (4)$$

na qual a função de aptidão do enlace i para atender a solicitação de m fluxos de tráfego é calculada pela soma de pesos

$$fit(i, k) = \sum_{l=1}^8 n_{il}(k) r_{il}, \quad (5)$$

na qual $n_{il}(k)$ é o número de comprimentos de onda inativos com respeito ao enlace i , em que o comprimento de onda k pode transportar m fluxos; $n_{i2}(k)$ é o número de enlaces da rota i que estão atualmente incapazes de suportar m fluxos no comprimento de onda k ; $n_{i3}(k)$ é o comprimento da rota; $n_{i4}(k)$ e $n_{i5}(k)$ são, respectivamente, o número de compensadores de

PMD e o número de amplificadores ópticos; $n_{i6}(k)$ é o número de conversões de comprimentos de onda realizadas pelo nó WGXC, $n_{i7}(k)$ e $n_{i8}(k)$ são, respectivamente, o número de nós WSXC e de nós WGXC necessários para estabelecer a conexão ao longo da rota i ; $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7$ e r_8 são coeficientes associados a cada $n_l(k)$.

A função de aptidão, (4), estima o custo de cada comprimento de onda k para cada trajeto i , isto é, representa o custo para a escolha do comprimento de onda k para servir à solicitação da rota i . O desempenho do algoritmo, para uma taxa de tráfego particular de m fluxos, e o desempenho global do algoritmo podem ser avaliados, respectivamente, pelas probabilidades de bloqueio p_m e P_b dadas por

$$p_m = \frac{\text{número de } m \text{ requisições bloqueadas}}{\text{número de } m \text{ novas requisições}}, \quad (5)$$

$$P_b = \frac{\text{número de requisições bloqueadas}}{\text{número de novas requisições}}. \quad (6)$$

VI. RESULTADOS NUMÉRICOS

O modelo proposto foi avaliado por meio de simulação computacional de tráfego dinâmico na topologia da rede italiana de faixa larga, conforme ilustra a Fig.1 [7].

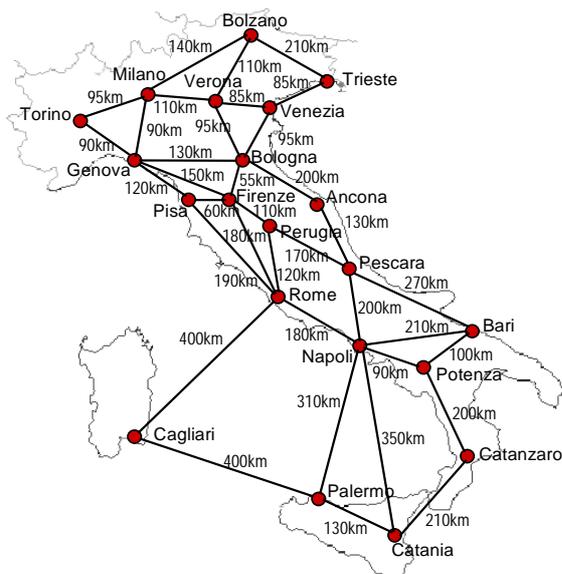


Fig. 1. Topologia da rede italiana de faixa larga, consistindo de 21 nós e 36 enlaces bidirecionais [7].

O número de comprimento de onda, W , por enlace é 15 e a capacidade máxima de cada um deles é 10 Gbps. As solicitações de conexão entre os nós fonte-destino são geradas de acordo com distribuição de Poisson. Foi utilizado roteamento alternativo, isto é, a rota para atender cada solicitação é selecionada entre um conjunto formado pelos 5 menores caminhos entre nós fonte-destino previamente determinados. Se nenhuma rota puder acomodar a solicitação, ela é bloqueada. Cada solicitação de conexão pode dispor de taxa de transmissão m , tal que $1 \leq m \leq g$, com $g = 4$, geradas com igual probabilidade. O tempo de permanência das solicitações segue uma distribuição exponencial com tempo

médio $1/\mu = 60$ s. As fibras ópticas que compõem os enlaces foram divididas em dois conjuntos iguais, com parâmetros PMD $0,1ps/\sqrt{km}$ e $0,5ps/\sqrt{km}$. As fibras foram dispostas nos enlaces de forma aleatória. Se o comprimento da rota exceder o limite imposto pela PMD, então será necessário alocar um compensador nos nós intermediários para recuperar o sinal original. Os compensadores de PMD foram disponibilizados pelo AG nos nós mostrados na Tabela 2. A atenuação nas fibras ópticas é 0,1 dB/km, e a distância máxima entre os amplificadores ópticos é 120 km. Todos os nós estão equipados com amplificadores ópticos, assim como os enlaces que excedem a distância máxima. Foram adotados $SNR_{\min} = 20$ dB; $P_L = 4$ dBm; $n_{sp} = 2,5$; $G = 25$ dB e $h\nu B_0 = -58$ dBm, resultando em um número máximo de lances $M_A = 10$.

TABELA 2. ALOCAÇÃO DOS COMPENSADORES DE PMD EM ALGUNS NÓS

Nó	Bologna, Pisa, Ancona, Roma, Napoli, Cagliari, Palermo
----	--

Os resultados das simulações, obtidos por meio de (1) e (6) estão apresentados nas Fig. 2, Fig. 3 e Fig. 4. Os nós com agregação de tráfego são sequencialmente acrescentados à rede e foram posicionados pelo AG conforme a Tabela 3.

TABELA 3. ALOCAÇÃO DOS NÓS COM AGREGAÇÃO DE TRÁFEGO

Seqüência de acréscimo de nós	Localização
0	-----
3	Bologna, Roma, Napoli,
6	Genova, Firenze, Pescara,
9	Verona, Pisa, Ancona,
12	Milano, Veneza, Perugia,
15	Potenza, Bari, Palermo,
18	Bolzano, Cagliari, Catania,
21	Trieste, Torino, Cantazaro.

A Fig. 2 mostra a probabilidade de bloqueio e a imparcialidade em função da quantidade de nós com agregação de tráfego realizada por meio de comutadores com agregação plena WSXC. Se os nós da rede óptica são do tipo WSXC, o desempenho em relação à probabilidade de bloqueio global melhora. Entretanto, a imparcialidade de tráfego é degradada, caso não seja implementando um CAC. O modelo apresentado garante imparcialidade unitária, mas provoca um inevitável pequeno aumento no bloqueio global das solicitações. Por exemplo, para a rede equipada com 6 e 15 nós WSXC, as probabilidades de bloqueio para a rede, considerando os efeitos ASE e PMD sem CAC, são 10,68% e 6,89%, e os valores de imparcialidade são 1,24 e 2,31, respectivamente. Utilizando CAC, as probabilidades de bloqueio são 11,48% e 8,92%, e a imparcialidade é unitária. O custo da imparcialidade de tráfego se apresenta como um aumento no número de requisições bloqueadas de 6,96% e 22,75%, respectivamente.

A Fig.3 mostra a probabilidade de bloqueio e imparcialidade em função da quantidade de nós com agregação de tráfego realizada por meio de comutadores com agregação plena WGXC. O desempenho em relação à probabilidade de bloqueio global é superior ao obtido com

nós WSXC. Ainda, o CAC garante imparcialidade unitária com menor degradação no bloqueio global de solicitações. Por exemplo, utilizando 6 e 15 nós WGXC para a rede, considerando os efeitos ASE e PMD sem CAC, as probabilidades de bloqueio são 3,67% e 2,05%, e os valores de imparcialidade são, respectivamente, 6,92 e 29,10. Utilizando o CAC, as probabilidades de bloqueio são 6,47% e 5,00%. Em relação à rede com nós WSXC (Fig. 2), estes resultados representam uma melhoria de 44% na probabilidade de bloqueio global da rede.

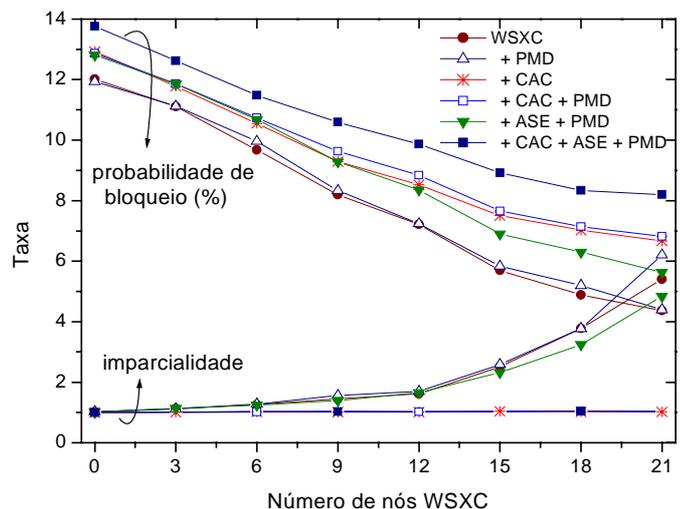


Fig. 2. Probabilidade de bloqueio (%) e imparcialidade versus quantidade de nós com agregação de tráfego para a rede italiana de faixa larga utilizando comutadores com agregação restrita WSXC, 15 comprimentos de onda e tráfego de 9 erlangs.

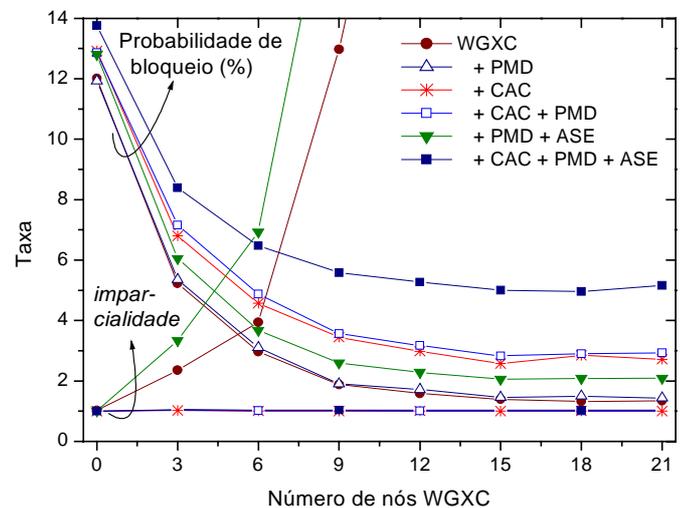


Fig. 3. Probabilidade de bloqueio (%) e imparcialidade versus quantidade de nós com agregação de tráfego para a rede italiana de faixa larga utilizando comutadores com agregação plena WGXC, 15 comprimentos de onda e tráfego de 9 erlangs.

Entretanto, os nós WGXC são equipados com dispositivos mais complexos e mais caros que os WSXC. Uma opção consiste em equipar a rede com uma combinação de nós WSXC e WGXC. Os resultados desta alternativa são mostrados na Fig. 4 por meio da probabilidade de bloqueio e imparcialidade versus quantidade de nós com agregação de tráfego. Utilizando 6 e 15 nós WGXC para rede sem CAC, as probabilidades de bloqueio, considerando os efeitos ASE e

PMD, são 2,46% e 2,04%, e os valores de imparcialidade são indeterminados. Utilizando CAC, as probabilidades de bloqueio são 5,48% e 5,13%, respectivamente. A combinação permite o *grooming* em todos nós da rede e habilita a conexão de rotas extensas com múltiplos *hops*, o que exige maior uso dos recursos da rede.

O CAC tende a priorizar as solicitações com taxas de tráfego maiores e a bloquear as chamadas com taxas menores. Por outro lado, os efeitos provocados pela PMD são proporcionais à taxa de transmissão e as solicitações com taxas de transmissão mais elevadas tendem a ser bloqueadas. Adicionalmente, os efeitos da ASE são proporcionais ao comprimento do enlace e as solicitações de rotas mais extensas tendem a ser bloqueadas. Um ponto de equilíbrio envolvendo o custo dos equipamentos e o retorno em termos de capacidade do sistema deve ser encontrado. Por exemplo, para a combinação WSXC e WGXC uma possível solução para se obter o menor custo seria o uso de 3 nós WGXC e 18 WSXC, com probabilidade de bloqueio de 5,81%. Se o objetivo for melhorar o desempenho, 9 nós poderiam ser WGXC e 12 WSXC, com bloqueio de 5,37%.

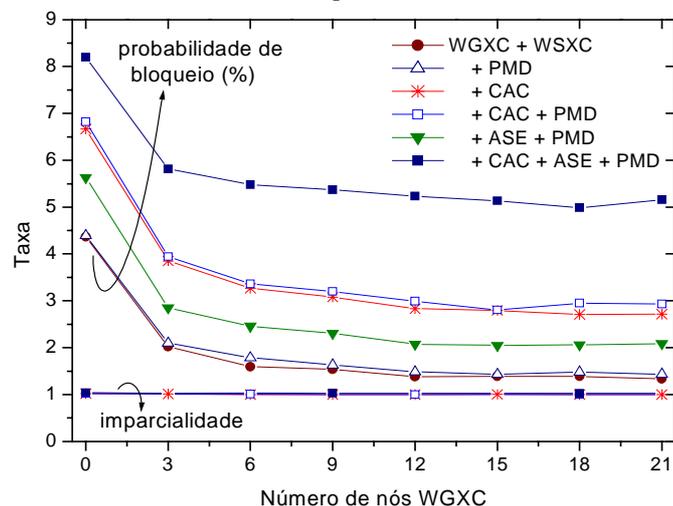


Fig. 4. Probabilidade de bloqueio (%) e imparcialidade versus quantidade de nós com agregação de tráfego para a rede italiana de faixa larga utilizando comutadores com agregação plena WGXC e comutadores com agregação restrita WSXC aos outros nós da rede. Há 15 comprimentos de onda e tráfego de 9 erlangs.

A Tabela 4 mostra o tempo médio de simulação do AG para o atendimento de requisição de conexão com CAC considerando a rede sem e sob os efeitos de ASE e PMD.

TABELA 4. TEMPO DE ATENDIMENTO DE REQUISIÇÃO (MILISSEGUNDOS) SEM E COM EFEITOS DE ASE +PMD

Nós Agregação	WSXC		WGXC		WSXC+WGXC	
	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
0	53,807	62,105	53,807	62,105	66,361	69,697
3	55,144	70,660	55,058	68,934	74,006	71,536
6	59,004	72,927	60,981	70,183	79,955	77,295
9	59,731	75,504	69,542	70,208	81,885	78,859
12	61,571	84,935	70,104	75,608	84,092	80,584
15	63,335	77,792	73,666	78,084	84,910	81,607
18	64,340	78,755	74,576	79,736	85,232	82,075
21	66,361	69,697	77,096	81,446	77,096	81,446

As simulações foram realizadas em microcomputador Pentium IV, 2,2 GHz e 512 MB de memória RAM.

VII. CONCLUSÕES

Um algoritmo RWA heurístico baseado em AG com objetivo de reduzir a probabilidade de bloqueio global das solicitações de conexão em redes ópticas é proposto. O algoritmo realiza agregação dinâmica de tráfego e imparcialidade de capacidade de largura de faixa de comprimento de onda, além de incluir restrições da camada física como PMD e ASE. As simulações foram realizadas considerando a topologia da rede italiana de faixa larga e tráfego dinâmico. Os resultados numéricos mostram desempenho promissor da abordagem proposta.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pelo apoio a esta pesquisa (proc. no. 00/9180-1). Agradecem também aos revisores anônimos pelas valiosas sugestões.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Strand, R. Doverspike, and G. Li, "Importance of wavelength conversion in an optical network", *Optical Networks Magazine*, pp. 24-32, May/June 2001.
- [2] R. Dutta and G.N. Rouskas, "Traffic grooming in WDM networks: past and future", *IEEE Network*, vol.16, no. 6, pp. 46-56, Nov.-Dec. 2002.
- [3] S. Thiagarajan and A. K. Somani, "Capacity fairness of WDM networks with grooming capabilities", *Optical Networks Magazine*, pp. 24-32, May/June 2001.
- [4] S. Thiagarajan and A. K. Somani, "Performance analysis of WDM optical networks with grooming capabilities", Proc. SPIE Int. Symp. On Voice, Video, and Data Communication. -Terabit Optical Networking: Arch., Control, and Management, Boston, nov. 2000.
- [5] J. Strand, A.L. Chiu and R. Tkach, "Issues for routing in the optical layer", *IEEE Commun. Magazine*, vol. 39, no. 2, pp. 81-87, fev. 2001.
- [6] R. Sabella, E. Iannone, M. Listanti, M. Berdusco and S. Binetti, "Impact of transmission performance on path routing in all-optical transport networks", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, no. 11, pp. 1965-71, November 1998.
- [7] M. Ali, D.E.D. Cosaque and L. Tancevski, "Network optimization with transmission impairments-based routing", *ECOC'01 Amsterdam*, 2001.
- [8] K.G. Ramakrishnan e M.A. Rodrigues, "Optimal routing in shortest-path data networks", *Bell Labs Tech. J.*, pp. 117-137, jan.-jun. 2001.
- [9] B. Chen e J. Wang, "Efficient routing and wavelength assignment for multicast in WDM networks", *IEEE J. on Selected Areas in Commun.*, vol. 20, no. 1, pp. 97-109, jan. 2002.
- [10] K. F. Man, K. S. Tang and S. Kwong, "Genetic algorithms: concepts and designs", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 519-534, vol. 43, no. 5, out. 1996.
- [11] H. Chou, G. Premkumar, and Chao-Hsien Chu, "Genetic algorithms for communications network design—An empirical study of the factors that influence performance", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 5, no. 3, pp. 236-249, jun. 2001.
- [12] Lima M.A.C., César A. C., and Araújo A.F.R., "Wavelength Converters Placement Based on Genetic Algorithm", IMOC, Foz do Iguçu, Brasil, 2003.
- [13] V.R. Konda and T.Y. Chow, "Algorithm for traffic grooming in optical networks to minimize the number of transceivers". *Proc. IEEE Workshop High Perf. Switching and Routing*, pp. 218-21, maio 2001.
- [14] R. Barr and R.A. Patterson, "Grooming telecommunications networks", *Optical Networks Magazine*, pp. 20-23, maio-jun. 2001.
- [15] O. Gerstel and R. Ramaswami, "Cost-effective traffic grooming in WDM rings", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 8, no. 5, pp. 618-630, out. 2000.
- [16] R. Berry and E. Modiano, "Reducing electronic multiplexing costs in SONET/WDM rings with dynamically changing traffic", *IEEE J. on Selected Areas in Commun.*, vol. 18, no. 10, pp. 1961-71, out. 2000.