

Agregação Dinâmica de Tráfego em Rede Brasileira de Comunicação Óptica WDM e Via Satélite Utilizando Algoritmo Genético

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

Resumo— A simulação de uma rede de comunicação óptica WDM combinada com uma rede via satélite, cobrindo o território brasileiro, é descrita neste artigo. A abordagem escolhida utiliza algoritmo genético (AG). A rede óptica é formada por 44 nós roteadores e 56 enlaces e a rede via satélite por 14 estações terrestres. A interconexão entre as redes é feita por meio de 5 nós (estações terrestres) estrategicamente posicionados. O trecho óptico é composto de roteadores com capacidade de agregação dinâmica de tráfego. O AG proposto ajusta as conexões aos nós, equaliza o tráfego na rede, minimiza a probabilidade de bloqueio, determina a distribuição esparsa ótima dos recursos da rede e identifica as rotas e dispositivos mais utilizados. Resultados numéricos atestam a potencialidade da abordagem proposta de gerenciamento de redes com características distintas.

Palavras-chave— Rede óptica WDM, rede via satélite, tráfego dinâmico, agregação de tráfego, alocação de recursos, otimização, algoritmo genético.

Abstract— This paper describes the simulation of an optical WDM network combined with a satellite communication network, covering the Brazilian territory. The approach is based on genetic algorithm (GA). The optical branch is formed by 44 nodes and 56 links, whereas the satellite terrestrial-base network is formed by 14 stations. The interconnection between the networks is made by means of 5 optical nodes (terrestrial base stations) strategically located. The optical nodes have traffic grooming capability. The proposed GA adjusts the connections to the nodes, balances the traffic in the overall network, minimizes the blocking probability of connection requests, searches for the best possible sparse allocation of the network resources and identifies the most used routes and devices. Numerical results show the potential of the GA approach to manage networks with distinct characteristics.

Keywords—WDM networks, satellite networks, dynamic traffic, grooming, resource assignment, optimization, genetic algorithm.

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.

Esta pesquisa foi parcialmente financiada pela FAPESP (proc. no. 00/9180-1) e pelo Projeto Giga, CPqD, FINEP, FUNTTEL, contrato FIPAI-CPqD no. 1360.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem havido crescente demanda por aumento da largura de faixa, oriunda principalmente do tráfego gerado na Internet, exigindo constante melhoria do desempenho das redes de telecomunicações. Por conta desta demanda, houve aumento da complexidade das redes de telefonia fixa, de comunicação móvel celular e via satélite. Felizmente, a tecnologia óptica tem sido capaz de atender a boa parte desta demanda por largura de faixa, sendo a principal alternativa de rede de transporte de volumes elevados de tráfego.

As redes ópticas operam a partir da tecnologia de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM— *wavelength division multiplexing*). Neste esquema, os vários comprimentos de onda são justapostos e transmitidos em uma única fibra. Desta forma, a técnica WDM não só habilita o uso da enorme largura de faixa da fibra, como também provê a rede de canais com largura de faixa individual adequada à capacidade dos dispositivos eletrônicos convencionais de processamento de informação.

Por outro lado, as redes via satélite permitem acesso de regiões inacessíveis às redes de telecomunicações globais. São elas as regiões que tornam inviável o uso de cabos ou enlaces de microondas com várias estações. Assim, o uso de satélites em uma rede de comunicação nacional, devido à extensão e presença de regiões isoladas das metrópoles, é uma solução que apresenta melhor custo-benefício.

As várias redes de telecomunicações estão hoje interligadas, permitindo a ampliação dos serviços, otimizando e compartilhando recursos e estabelecendo novos desafios tecnológicos oriundos da interconexão. A convencional expansão proporcional dos recursos físicos para atender à demanda é limitada pelo custo elevado e o gerenciamento eficaz dos recursos das redes passa a ser um dos alvos principais da pesquisa tecnológica. Neste contexto, as redes devem estar providas de esquemas para gerenciar a largura de faixa e lidar com alocação de comprimentos de onda e canais, características de dispositivos e agregação de tráfego.

O problema de alocação de recursos em redes de telecomunicações, em particular o que trata de roteamento e alocação de comprimentos de onda (RWA— *routing and wavelength assignment*) em redes ópticas WDM, pode ser modelado como um problema de otimização dinâmica com restrições em grande escala em um ambiente estocástico. Várias abordagens têm sido propostas para resolver este tipo

de problema [1], [2]. No caso de redes via satélites, a otimização de recursos também tem sido tratada [3], [4]. A interligação destes dois tipos de redes considera, principalmente, gerenciar características distintas, como largura de faixa. Entretanto, o problema de otimização de recursos nestes dois tipos de redes tem sido tratado de forma isolada.

A interligação de redes óptica WDM e via satélite, cobrindo o território brasileiro, é tratada neste artigo. Em parte do território há somente estações terrestres da rede via satélite. A comunicação pode ser realizada entre as estações terrestres diretamente via satélite, ou entre qualquer nó da rede óptica por meio de estações terrestres localizadas em cinco capitais com nós roteadores. Estes nós roteadores permitem o acesso de tráfego de qualquer nó pertencente à rede óptica para qualquer localidade servida pela rede via satélite.

A solução do problema da alocação simultânea dos recursos das redes é feita por meio de algoritmo genético. A probabilidade de bloqueio é minimizada considerando características das duas redes. O tráfego nas redes é heterogêneo e há dois tipos de configuração de nó óptico, capazes de realizar roteamento de comprimento de onda e agregação de tráfego. Os resultados numéricos indicam a aplicabilidade da abordagem proposta na gerência integrada de redes distintas, identificando rotas e dispositivos mais utilizados.

II. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A. Descrição da Rede Híbrida

A rede híbrida brasileira formada por enlaces de fibra óptica e estações terrestres para comunicação via satélite é mostrada na Figura 1. As características principais das duas redes são descritas a seguir.

1) Rede Óptica

A rede óptica é formada por 44 nós roteadores e 56 enlaces e está conectada à rede via satélite por meio de 5 nós estrategicamente localizados. Os enlaces da rede óptica apresentam distribuição heterogênea de comprimentos de onda e dispõem de 4 comprimentos de onda, exceto o anel formado pelos nós 21, 22, 29, 30, 31 e 32, que, por causa da grande demanda, dispõe de 8. A banda básica é 2,5 Gbps e a taxa total 10 Gbps. Em cada comprimento de onda podem ser agregadas até 4 bandas básicas.

2) Rede Via Satélite

A rede via satélite é formada por 14 estações terrestres, das quais 5 estão interligadas à rede óptica. A banda básica é 622 Mbps e as estações são equipadas com transceptores digitais com 4 canais de taxa total 2,5 Gbps cada um. Em cada canal podem ser agregadas até 4 bandas básicas. A comunicação entre estações é realizada por meio de um enlace englobando um satélite geoestacionário.

As requisições para os nós das estações terrestres não podem exceder a taxa de transmissão máxima de 2,5 Gbps. Foram disponibilizados 4 transceptores por estação terrestre,

para os quais são permitidas taxas de transmissão múltiplas de 622 Mbps. Neste nosso estudo consideramos que o enlace via satélite satisfaz as condições mínimas de potência de sinal e relação sinal-ruído.

3) Configuração de Nó

A modelagem dos nós da rede óptica é a mesma empregada por estes autores em artigo anterior [1].

A rede óptica a ser investigada neste artigo é dotada com dois tipos de arquitetura de nós, conforme proposição de Thiagarajan e Somani [5]. São eles: nó seletivo em comprimento de onda (WSXC— *wavelength selective crossconnect*) e nó com capacidade de agregação de tráfego em comprimento de onda (WGXC— *wavelength grooming crossconnect*). Os dois tipos são compostos por OXCs e OADMs. O OXC comuta fluxo de tráfego de qualquer comprimento de onda presente na entrada para qualquer comprimento de onda presente na saída (comutação completa). O OADM extrai e adiciona comprimento de onda à fibra. A agregação de tráfego de baixa capacidade (faixa estreita) é feita de forma eletrônica em camada IP, ATM ou SONET/SDH. Os dois tipos de nó são capazes de realizar agregação, mas de forma diferenciada. O nó WSXC realiza agregação restrita, porque não possui capacidade de agregar tráfego entre comprimentos de onda distintos. Por outro lado, o nó WGXC possui todas as funcionalidades do nó WSXC, acrescida da capacidade de agregação completa. Ele é capaz de agregar fluxo de tráfego de baixa capacidade de um comprimento de onda para outro. 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 [5].

As solicitações de tráfego não podem ser divididas entre comprimentos de onda diferentes. Consideramos ainda que há equipamento em número suficiente nos nós 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.

a) Tráfego e Probabilidade de Bloqueio

A distribuição de tráfego é dinâmica, heterogênea e proporcional ao número de habitantes das regiões atendidas pelos nós roteadores, H_j , conforme apresentado na Tabela 3. A probabilidade, P_o , de um nó ser escolhido para oferecer tráfego à rede é dada pelo percentual do número de habitantes da região em relação ao total de habitantes do país,

$$P_o = \frac{H_o}{\sum_n H_n} \quad (1)$$

Definido o nó origem, a probabilidade, P_d , de escolha de um nó destino é determinada pelo percentual de habitantes remanescentes,

$$P_d = \frac{H_d}{N} \cdot \sum_{n, H_o=0}^N H_n \quad (2)$$

III. ROTEAMENTO E ALOCAÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA

Os objetivos do RWA baseado em AG, proposto neste trabalho, são: 1) maximizar o desempenho da rede para um dado conjunto de recursos, priorizando o uso da rede óptica; 2) atender a todas as solicitações de tráfego; e 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. Em geral, existem quatro operações possíveis para estabelecer com sucesso o tráfego entre os nós fonte e destino: distribuir o tráfego em um ou em vários caminhos ópticos já alocados; habilitar um ou mais novos caminhos ópticos conectando o nó fonte ao nó destino.

A solução para a rede óptica foi obtida em duas etapas distintas: 1) escolha da posição dos nós equipados com capacidade WSXC/WGXC; e 2) otimização da rota e os respectivos comprimentos de onda para atender cada conexão. O objetivo é determinar as posições apropriadas para os nós WSXC e WGXC tais que a probabilidade de bloqueio 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 [6]: 1) restrições de roteamento de caminho óptico; 2) restrições de alocação de comprimento de onda ao caminho óptico; e 3) restrições 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 [7]. 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 [8]. Eles devem ser resolvidos por meio de técnicas heurísticas [9], [10] para se obter soluções adequadas em um intervalo de tempo razoável.

IV. ALGORITMO GENÉTICO

No modelo proposto, cada gene, (c_{ijk}) , representa em forma binária um estado do comprimento de onda. O conjunto de genes formam 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 ilustra a Tabela 1.

TABELA 1. REPRESENTAÇÃO DA POLÍTICA DO SISTEMA.

| l_1 | | | \dots | | | l_L | | | | | | |
|-----------|---------|-----------|------------|---------|------------|---------|-----------|---------|-----------|------------|---------|------------|
| w_1 | | | w_w | | | w_1 | | | w_w | | | |
| c_{l11} | \dots | c_{l1g} | c_{l1w1} | \dots | c_{l1wg} | \dots | c_{lL1} | \dots | c_{lLg} | c_{lLw1} | \dots | c_{lLwg} |

na qual

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

O algoritmo genético procura uma política— um conjunto dos estados de todos os comprimentos de onda— 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 [11], 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 foram realizadas. 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%.

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, e do enlace. O uso de um comprimento de onda diminui a largura de faixa disponível, aumentando o potencial de bloqueio das solicitações futuras. O custo do transceptor inclui o custo do equipamento terminal, assim como o do equipamento que realiza o processamento eletrônico.

A. 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

$$fit_{tot} = \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^W fit(i, k), \quad (3)$$

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

$$fit(i, k) = \sum_{l=1}^6 n_{il}(k) r_l, \quad (4)$$

na qual $n_{i1}(k)$ 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 nós WSXC e de

nós WGXC necessários para estabelecer a conexão ao longo da rota i ; e $n_{i6}(k)$ é o número de conversões de comprimentos de onda realizadas pelo nó WGXC; $r_1 = +5$, $r_2 = -1$, $r_3 = -2$, $r_4 = -5$, $r_5 = -10$, e $r_6 = -15$ são coeficientes associados a cada $n_{ii}(k)$. Os valores numéricos foram obtidos heurísticamente por meio de extensivas simulações.

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 podem ser avaliados, respectivamente, pelas probabilidades de bloqueio p_m e P_b , dadas por

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

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

V. RESULTADOS NUMÉRICOS

A análise dos resultados da rede híbrida de telecomunicações brasileira foi dividida em redes óptica e via satélite. Ainda, foi incluída uma subdivisão no sistema de comunicações via satélite, denominada rede auxiliar. A rede auxiliar é formada pelos enlaces via satélite entre as estações terrestres que estão ligadas à rede óptica. Na rede auxiliar, a taxa de transmissão é limitada a 2,5 Gbps e o sinal pode ser afetado pelo atraso de propagação. Assim, o algoritmo RWA deverá oferecer tráfego a esta rede somente quando não existirem recursos disponíveis na rede óptica, ou em condição de falha em equipamentos ou perda de enlaces. Desta forma, a não ser excepcionalmente, o tráfego deve ser atendido por caminhos de menor atraso de propagação. No caso de caminhos envolvendo enlace via satélite, o atraso a que o sinal está sujeito deve situar-se dentro do valor admissível.

A probabilidade de bloqueio para a rede nacional em função da demanda de tráfego está apresentada na Figura 2.(a). A probabilidade de bloqueio para configuração de rede com agregação esparsa, realizada por meio de comutadores com agregação restrita WSXC e plena WGXC, está apresentada na Figura 2.(b). O desempenho da rede equipada com roteadores com capacidade de agregação plena WGXC está apresentado na Figura 2.(c).

O desempenho em relação à probabilidade de bloqueio global é melhor quando se utilizam modelos com agregação de tráfego. Por exemplo, considerando uma demanda de tráfego oferecido de 4 ($\times 5,3$ erlangs), as probabilidades de bloqueio para a arquitetura de rede óptica sem e com agregação são 6,77% e 0,47%. Se o tráfego for 8 ($\times 5,3$ erlangs), as probabilidades de bloqueio são 26,06% e 6,77%, respectivamente. Estes resultados representam uma melhoria de 93% e 74% na probabilidade de bloqueio global da rede. Ainda, a configuração esparsa garante menor degradação no bloqueio global de solicitações com menor custo dos dispositivos de rede. Por exemplo, considerando a configuração apresentada, 9 WSXC + 6 WGXC, as probabilidades de bloqueio são 1,77% para 4 ($\times 5,3$ erlangs), e

11,55% para 8 ($\times 5,3$ erlangs). Em relação à rede sem agregação, estes resultados representam uma redução no número de requisições bloqueadas de 73% e 55%, respectivamente, para 4 ($\times 5,3$ erlangs) e 8 ($\times 5,3$ erlangs).

Ao se equipar a rede com nós com capacidade de agregação de tráfego o uso da rede auxiliar é reduzido, conforme mostrado na Figura 3. Considerando a rede sem agregação e uma demanda de tráfego de 8 ($\times 5,3$ erlangs), o tráfego médio por enlace oferecido à rede auxiliar é 0,34 erlangs. Equipando-se a rede com agregação plena, o tráfego é reduzido para 0,005 erlangs. Conseqüentemente, a ocupação dos enlaces da rede auxiliar também é reduzida. Por exemplo, considerando uma demanda de tráfego de 4 ($\times 5,3$ erlangs), a ocupação é reduzida de 1,75%, no caso de rede sem agregação, para 0,20%, no caso de rede com agregação esparsa, e para 0,0069% no caso de rede com agregação plena. Se a demanda de tráfego for 8 ($\times 5,3$ erlangs), a redução é de 8,50% para 2,30% e 0,12% para rede com agregação esparsa e plena, respectivamente.

Em cada período de tempo, o algoritmo verifica as novas requisições, determina a melhor rota e os respectivos comprimentos de onda para estabelecer a conexão. O tempo médio para o modelo proposto realizar o atendimento às solicitações de comprimento de onda em função do tráfego total oferecido é adequado. Na rede com agregação esparsa, o AG necessita em média de apenas 22,2 milissegundos para realizar o atendimento a uma nova requisição. Com agregação plena, o tempo necessário para o processamento é de apenas 26,1 milissegundos. O algoritmo foi desenvolvido em linguagem C e 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.

VI. CONCLUSÕES

A simulação de uma rede brasileira de comunicação óptica integrada a uma rede de comunicação via satélite foi apresentada neste artigo. A rede óptica está conectada à rede via satélite por meio de nós estrategicamente localizados. Os nós apresentam duas arquiteturas distintas: WSXC e WGXC. A banda básica da rede óptica é 2,5 Gbps, com taxa total 10 Gbps. As estações terrestres são equipadas com transceptores digitais com 4 canais de 2,5 Gbps cada um. A banda básica é 622 Mbps. A comunicação entre estações é realizada por meio de um enlace englobando um satélite geoestacionário. Foram utilizados dois tipos de nós de rede: WSXC e WGXC.

O desempenho da rede foi avaliado para rede com agregação plena, rede sem agregação e para duas configurações de agregação esparsa. O desempenho em relação à probabilidade de bloqueio global é melhor quando modelos com agregação de tráfego são utilizados. Por exemplo, em relação à rede sem agregação e considerando as demandas de tráfego de 4 e 8 ($\times 5,3$ erlangs), a melhoria da probabilidade de bloqueio global da rede com agregação plena é 93% e 74%, respectivamente. Para as demandas consideradas, a configuração esparsa apresenta redução no número de requisições bloqueadas de 73% e 55%, respectivamente.

Os resultados numéricos indicam a aplicabilidade da abordagem proposta na gerência integrada de redes distintas, identificando rotas e dispositivos mais utilizados. No caso do gerenciamento da rede híbrida brasileira, se for preciso aumentar a demanda de tráfego, o AG elegeu os enlace entre os nós 17 e 18 (Aracajú-Salvador) e 25 e 26 (Brasília-Palmas) como os candidatos a uma futura ampliação de capacidade.

TABELA 2. DISPOSIÇÃO DOS ROTEADORES.

| Roteadores | Nós equipados com chaves |
|------------|----------------------------------|
| WSXC | 6, 9, 14, 18, 30, 36, 37, 38, 41 |
| WGXC | 21, 22, 23, 25, 31, 32 |

REFERÊNCIAS

- [1] Marcos A.C. Lima, Aluizio F.R. Araújo e Amílcar C. César, "Agregação Dinâmica de Tráfego em Redes Ópticas WDM sob Impacto de ASE e PMD utilizando Algoritmo Genético", XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações-SBT'04, pp. 1-6 (CD-ROM), Belém, PA, 6 a 9 de setembro de 2004.
- [2] D. Bisbal, I. Miguel, F. González, J. Blas, J.C. Aguado, P. Fernández, J. Durán, R. Durán, R.M. Lorenzo, E.J. Abril e M. López, "Dynamic routing and wavelength assignment in optical networks by means of genetic algorithms", Photonic Network Communications, vol. 7, no. 1, pp. 43-58, 2004.
- [3] G. McMahon, R. Septiawan e S. Sugden, "A Multiservice Traffic Allocation Model for LEO Satellite Communication Networks", IEEE J. on Selected Areas in Commun., Vol. 22, No. 3, pp. 501-507, abril 2004.
- [4] S. Nanba, S. Konishi e S. Nomoto, "Optimum Traffic Distribution Algorithm for Multiple-Satellite Systems Under Power Constraints", IEEE J. on Selected Areas in Commun., Vol. 22, No. 3, pp. 492-500, abril 2004.
- [5] S. Thiagarajan and A.K. Somani, "Capacity fairness of WDM networks with grooming capabilities", Optical Networks Magazine, pp. 24-32, maio/junho de 2001.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] R. Barr and R.A. Patterson, "Grooming telecommunications networks", Optical Networks Magazine, pp. 20-23, maio-jun. 2001.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] K.F. Man, K.S. Tang e S. Kwong, "Genetic algorithms: concepts and designs", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 43, no. 5, pp. 519-534, outubro de 1996.

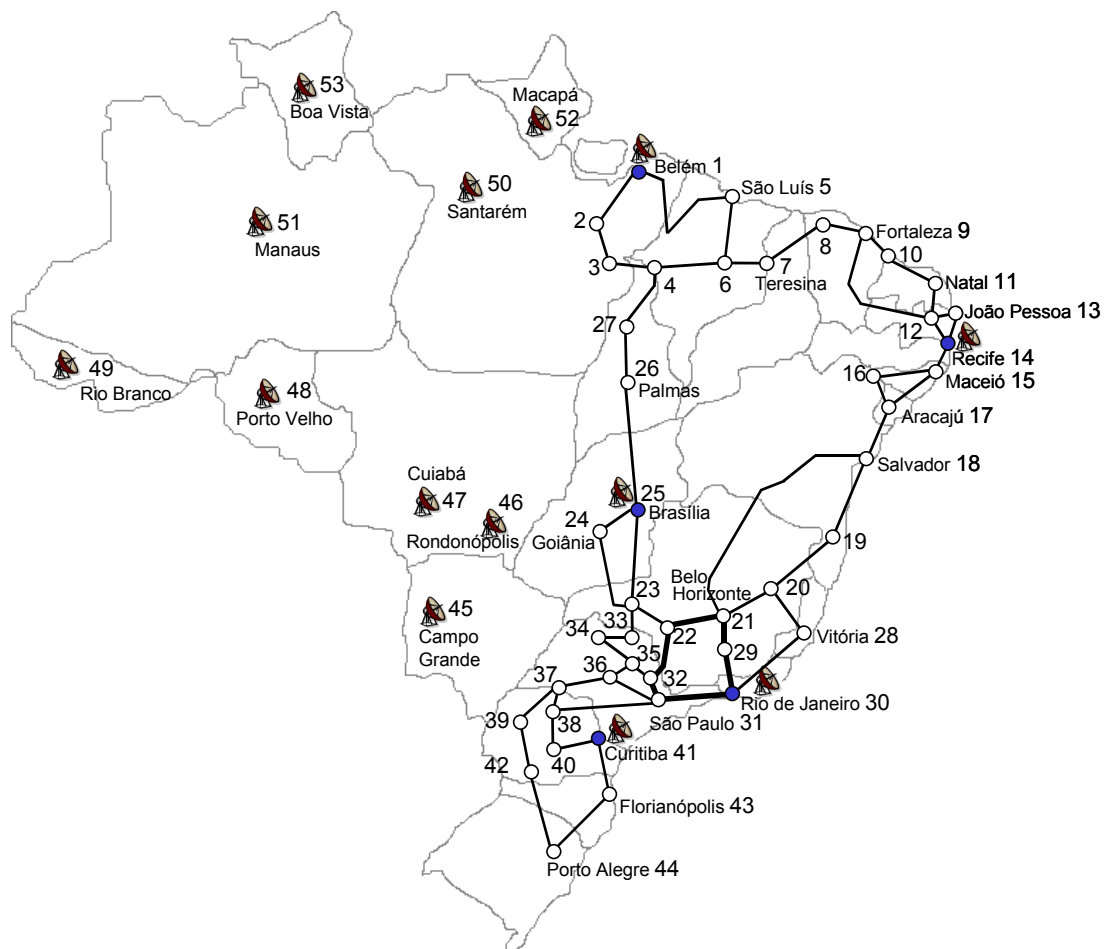


Figura 1. Rede híbrida brasileira formada por enlaces de fibra óptica e via satélite. Os nós roteadores em destaque são equipados com estações de comunicação por satélite. A rede óptica dispõe de $W=4$ comprimentos de onda. Os enlaces em destaque possuem $W=8$ por causa da grande densidade populacional da região. Na rede via satélite há $C=4$ transceptores disponíveis. A agregação utilizada é $g=4$.

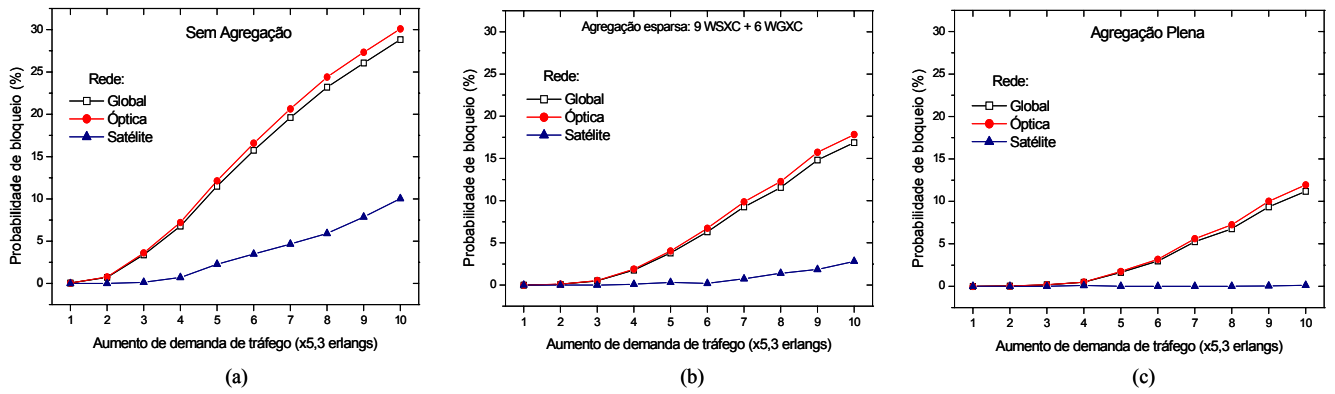


Figura 2. Probabilidade de bloqueio (%) em função do aumento de demanda de tráfego para a rede híbrida brasileira. (a) Sem capacidade de agregação; (b) utilizando 9 WSXC e 6 WGXC; e (c) utilizando comutadores com agregação plena WGXC.

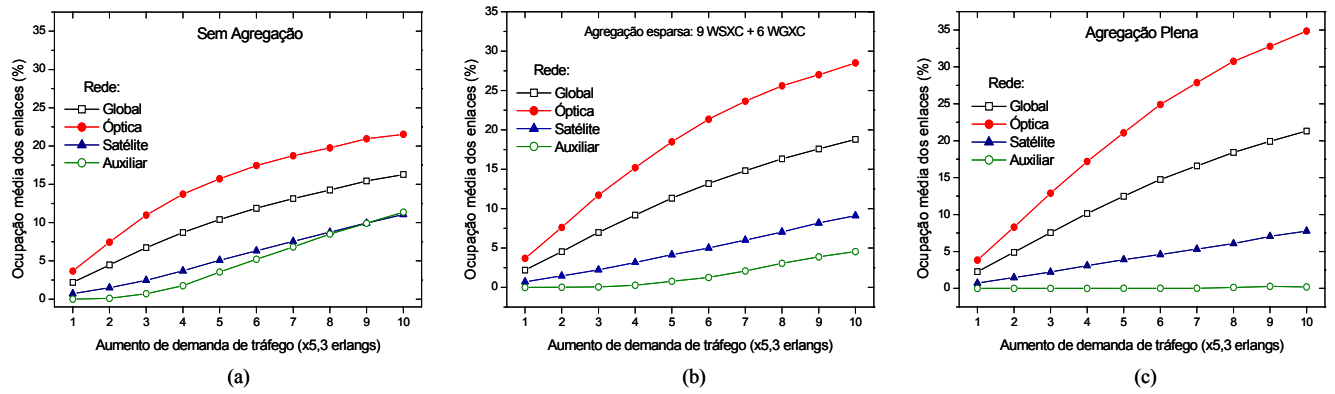


Figura 3. Ocupação dos enlaces (%) em função do aumento de demanda de tráfego para a rede híbrida brasileira. (a) Sem capacidade de agregação; (b) utilizando 9 WSXC e 6 WGXC; e (c) utilizando comutadores com agregação plena WGXC.

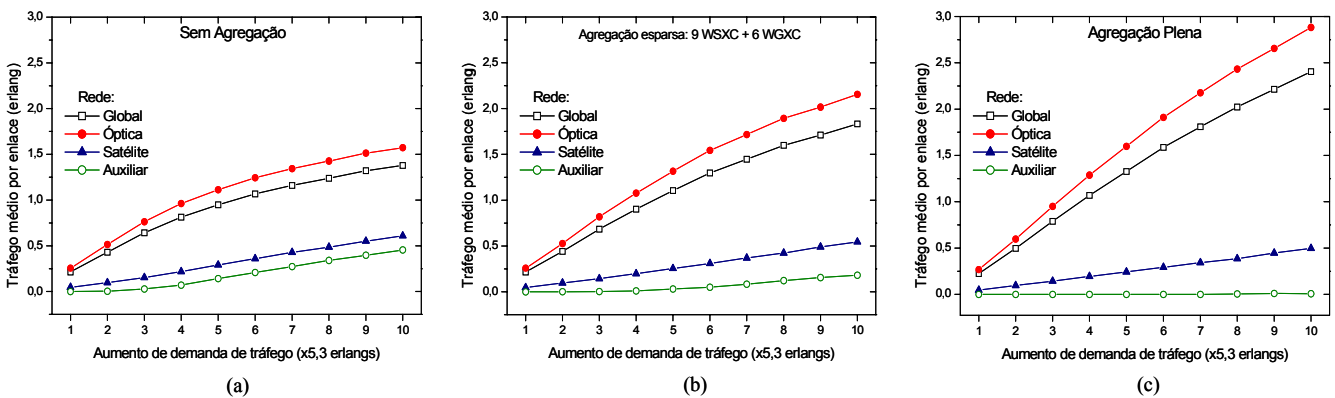


Figura 4. Tráfego médio por enlace (%) em função do aumento de demanda de tráfego para a rede híbrida brasileira. (a) Sem capacidade de agregação; (b) utilizando 9 WSXC e 6 WGXC; e (c) utilizando comutadores com agregação plena WGXC.

TABELA 3. NÚMERO DE MIL HABITANTES SERVIDOS PELOS NÓS ROTEADORES¹

| Nó | Região | Habit. | Nó | Região | Habit. | Nó | Região | Habit. | Nó | Região | Habit. |
|----|--------------|--------|----|----------------|--------|----|-----------------|--------|----|---------------|--------|
| 1 | Belém | 4442,6 | 16 | Delm. Golveia | 144,3 | 31 | São Paulo | 30244 | 46 | Rondonópolis | 593,8 |
| 2 | Tucuruí | 256,0 | 17 | Aracajú | 1784,4 | 32 | Campinas | 2809,8 | 47 | Cuiabá | 1910,5 |
| 3 | Marabá | 582,8 | 18 | Salvador | 12577 | 33 | Rib. Preto | 1463,5 | 48 | Porto Velho | 1379,7 |
| 4 | Porto Franco | 92,7 | 19 | Porto Seguro | 492,8 | 34 | São J. R. Preto | 1039,2 | 49 | Rio Branco | 557,5 |
| 5 | São Luís | 4789,4 | 20 | Gov. Valadares | 1235,3 | 35 | São Carlos | 559,4 | 50 | Santarém | 910,8 |
| 6 | Caxias | 769,3 | 21 | Belo Horizonte | 11189 | 36 | Baurú | 916,1 | 51 | Manaus | 2812,5 |
| 7 | Teresina | 2843,2 | 22 | P. de Caldas | 677,9 | 37 | Cambará | 99,7 | 52 | Macapá | 477,0 |
| 8 | Sobral | 502,3 | 23 | Uberlândia | 2505,3 | 38 | Ponta Grossa | 1199,4 | 53 | Boa Vista | 324,4 |
| 9 | Fortaleza | 6928,2 | 24 | Goiânia | 5003,2 | 39 | Camp. Mourão | 352,7 | | | |
| 10 | Mossoró | 641,1 | 25 | Brasília | 2051,1 | 40 | Guarapuava | 680,2 | | Reg. Sudeste | 72412 |
| 11 | Natal | 2135,6 | 26 | Palmas | 634,4 | 41 | Curitiba | 6958,4 | | Reg. Norte | 12900 |
| 12 | Campo Grande | 1283,6 | 27 | Araguaína | 522,6 | 42 | Pato Branco | 272,8 | | Reg. C. Oeste | 11636 |
| 13 | João Pessoa | 2160,1 | 28 | Vitória | 3097,2 | 43 | Florianópolis | 5356,3 | | Região Sul | 25107 |
| 14 | Recife | 7918,3 | 29 | Juiz de Fora | 2283,3 | 44 | Porto Alegre | 10187 | | Reg. Nordeste | 47741 |
| 15 | Alagoas | 2678,2 | 30 | Riode Janeiro | 14391 | 45 | Campo Grande | 2078,0 | | Brasil | 169799 |

¹Fonte: Censo IBGE 2000.