

## MODELO MARKOVIANO PARA ALOCAÇÃO DE ESPECTRO EM REDES WDM FLEXÍVEIS

**Marcos Paulo Lobo de Candia**

**Solon Venâncio de Carvalho**

**Rita de Cássia Meneses Rodrigues**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada – LAC

Avenida dos Astronautas, 1758, São José dos Campos – SP

marcosplcandia@gmail.com

{solon, rita}@lac.inpe.br

### RESUMO

A fibra óptica vem sendo utilizada para atender a crescente demanda de tráfego de dados em redes computacionais. As redes WDM flexíveis, recentemente propostas, oferecem capacidade de alocação dinâmica de espectro para acomodação de diferentes taxas de transmissão. Nestas redes, o problema fundamental, denominado como *Routing and Spectrum Allocation* (RSA), é rotear e alocar o recurso espectral para acomodar as requisições de conexão. O RSA pode ser dividido em dois subproblemas: roteamento e alocação de espectro. Na alocação de espectro, uma conexão é atribuída a um ou mais *slots* de espectro, dependendo da capacidade de transmissão requerida, e, se múltiplos *slots* são necessários, eles devem ser contíguos. Neste trabalho, estuda-se, por meio de um modelo markoviano, o subproblema de alocação de espectro em um *link* de uma rede WDM flexível. Uma heurística para acomodação das conexões que minimize a fragmentação de espectro é proposta e comparada a outras da literatura.

**PALAVRAS CHAVE.** Redes Ópticas Elásticas, Alocação de Espectro, Processo Markoviano.

**Área principal.** PO em Telecomunicações e Sistemas de Informações, Modelos Probabilísticos.

### ABSTRACT

Optical fiber has been used to supply the growing demand for data traffic in computer networks. The flexible WDM networks, recently proposed, provide capacity for dynamic spectrum allocation to accommodate different transmissions rates. In these networks, the fundamental problem, denoted by *Routing and Spectrum Allocation* (RSA), is routing and allocating spectrum resource to accommodate the connection requests. RSA can be divided into two sub problems: routing and spectrum allocation. In the spectrum allocation, a connection is assigned to one or more slots of spectrum depending on the transmission capacity required, and, if multiple slots are necessary, they must be contiguous. In this paper, we study, through a Markov model, the spectrum allocation sub problem on a link in a flexible WDM network. A heuristic for allocation of connections that minimizes the spectrum fragmentation is also proposed and compared to others from the literature.

**KEYWORDS.** Elastic Optical Networks. Spectrum Allocation. Markov Process.

**Main area.** OR in Telecommunications and Information Systems. Probabilistic Models.

## 1. Introdução

A tecnologia da fibra óptica tem sido utilizada para atender a crescente demanda de transmissão de dados em redes computacionais por apresentarem grande largura de banda (cerca de 50 *terabits* por segundo), baixa atenuação e distorção de sinal, baixo consumo de energia e baixo custo (Mukherjee, 2000).

Apesar do enorme salto na capacidade de tráfego de dados por sistemas de fibras ópticas, a velocidade na qual é possível modular sinais eletronicamente em equipamentos de usuários da rede não ultrapassa taxas de transmissão de *gigabits* por segundo (Gb/s). Essa diferença entre velocidade de transmissão óptica e processamento eletrônico é denominada gargalo eletrônico (*eletronic bottleneck*) (Choi e Lee, 1998).

Uma solução para o gargalo eletrônico é fazer uso da técnica de multiplexação por comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing* – WDM), que permite a transmissão simultânea de diferentes sinais por meio de vários comprimentos de onda numa única fibra óptica. WDM é, basicamente, a mesma técnica de multiplexação por divisão de frequência (*Frequency Division Multiplexing* – FDM) utilizada em sistemas de comunicação de rádio há mais de um século, na qual o espectro é dividido em bandas de frequência e cada usuário detém a posse de uma dessas bandas (Norouzi *et al.*, 2011).

No estabelecimento de uma conexão numa rede WDM deve-se determinar o roteamento e a atribuição de comprimentos de onda necessários para a implementação dos caminhos ópticos entre nós origem e destino, problema denominado *Routing and Wavelength Assignment* (RWA) (Zang *et al.*, 2000).

Nas redes WDM, os canais de transmissão adotam grades de frequência de tamanho fixo conforme especificações do padrão ITU-T (*International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector*), com capacidade de transmissão na ordem de Gb/s. Mesmo que a demanda da conexão seja menor que essa capacidade, uma grade inteira é alocada para acomodá-la, ocorrendo a utilização ineficiente do recurso espectral. Se o tráfego demandado é maior que essa capacidade, a chamada é separada e transmitida por comprimentos de ondas distintos, sendo vista pela rede como conexões diferentes. Para suprir as limitações das redes WDM, Jinno *et al.* (2009) introduzem as redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Networks* – EONs). Estas redes oferecem suporte ao provisionamento de largura de banda flexível para acomodação de diferentes taxas de transmissão, promovendo, assim, o aumento da eficiência espectral.

Na Figura 1 é apresentado um exemplo ilustrando as diferenças entre canais de transmissão com grades de tamanho fixo das redes WDM comuns e canais de transmissão com grades de tamanho flexível presentes nas redes ópticas elásticas. Nesta figura, o canal com grades fixas (topo) opera em intervalos de frequência de 50 GHz, que podem acomodar requisições de conexão com taxas de até 100 Gb/s. Quando esses canais acomodam conexões com taxas menores, como por exemplo 10 Gb/s, ocorre desperdício de espectro. Por outro lado, o canal com grades flexíveis (abaixo) oferece elasticidade em sua capacidade de transmissão, permitindo o ajuste da largura de banda conforme demanda do tráfego.

Uma arquitetura de rede óptica elástica, denominada rede WDM flexível (*Flexible Optical WDM Network* - FWDM), é proposta por Patel *et al.* (2010). Esta arquitetura baseia-se na tecnologia WDM e oferece capacidade de alocação dinâmica de seus recursos, em especial do espectro óptico, provisionamento dinâmico das conexões e controle automatizado da rede.

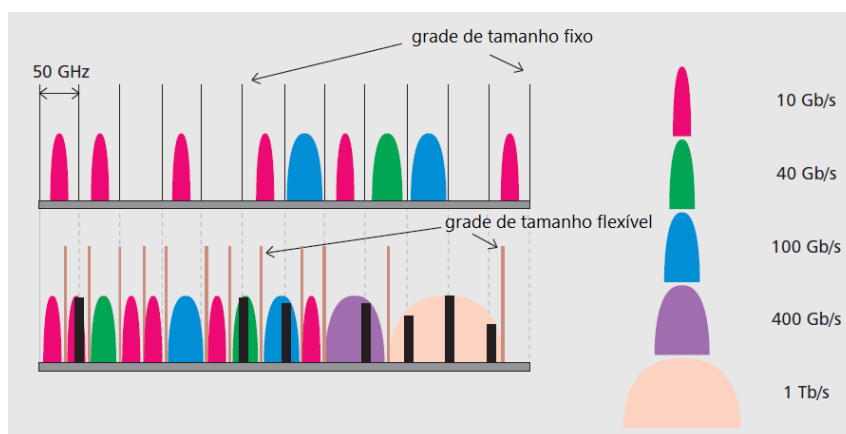


Figura 1 – Grades de tamanho fixo e flexível (Adaptada de Gerstel *et al.*, 2012)

O tradicional problema RWA é definido para as redes ópticas elásticas como problema de roteamento e alocação de espectro (*Routing and Spectrum Allocation – RSA*). Nestas redes, o espectro é visto como um recurso contínuo, sendo dividido em unidades de frequência de tamanho fixo, denominadas *slots*, cuja capacidade de transmissão é menor que a de uma grade nas redes WDM comuns (Jinno *et al.*, 2010). Cada conexão é atribuída a um ou mais *slots* de frequência, de acordo com sua demanda de transmissão. Se múltiplos *slots* são necessários, eles deverão ser contíguos, condição conhecida como restrição de continuidade de espectro (*spectrum continuity constraint*).

Quando caminhos ópticos compartilham o mesmo *link*, eles devem ser separados um do outro no domínio de espectro por uma banda de guarda (*guard band*), que consiste em uma parte reservada e não utilizada do recurso espectral. O objetivo de se utilizar bandas de guarda é evitar a interferência entre as conexões sendo transmitidas simultaneamente. Na Figura 2 apresenta-se um exemplo de alocação de espectro com incorporação de bandas de guarda em um *link* de uma rede WDM flexível.

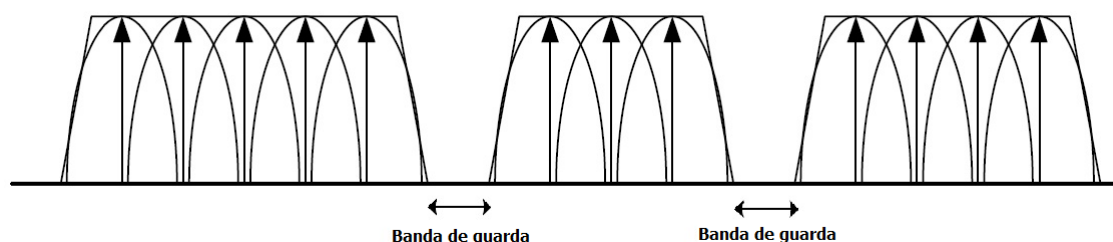


Figura 2 – Bandas de guarda (Adaptada de Christodoulopoulos *et al.*, 2010)

O problema RSA, assim como o RWA, pode ser estudado sob tráfegos estático e dinâmico. No caso estático (*off-line*), todo o conjunto de requisições de conexão é previamente conhecido, e, no caso dinâmico (*on-line*), as requisições de conexão chegam aleatoriamente e não há conhecimento sobre as requisições futuras.

Vários autores têm estudado as redes ópticas elásticas e o problema de roteamento e alocação de espectro. Christodoulopoulos *et al.* (2010) e Wang *et al.* (2011) tratam o RSA considerando condições de tráfego estático, formulando-o como um problema de Programação Linear Inteira (PLI) com o objetivo de minimizar o espectro utilizado. Christodoulopoulos *et al.* (2010) encontram soluções ótimas para o RSA aplicado a redes de pequeno porte (6 nós), enquanto Wang *et al.* (2011) obtêm soluções próximas ao ótimo, resolvendo-o para redes com 14 nós.

Devido à sua complexidade, o RSA comumente é dividido em dois subproblemas distintos: roteamento e alocação de espectro, que podem ser tratados separadamente. Uma formulação PLI sequencial, na qual primeiramente é resolvido o roteamento e, em seguida, a alocação de espectro, é apresentada por Christodoulopoulos *et al.* (2010), porém não há garantia de encontrar uma solução ótima.

Alguns algoritmos heurísticos têm sido desenvolvidos para resolução do problema RSA em cenários estático e dinâmico, com abordagens de uma ou duas etapas. Na abordagem de uma etapa, a determinação da rota e a atribuição de espectro são realizadas simultaneamente. Wan *et al.* (2011) propõem dois algoritmos (*Modified Dijkstra Shortest Path* - MSP e *Spectrum-Constraint Path Vector Searching* - SCPVS) para resolução do RSA em uma etapa. O algoritmo MSP verifica o espectro disponível no caminho mais curto obtido pelo algoritmo de *Dijkstra*, e o SCPVS constrói um caminho com a restrição de espectro para encontrar a melhor rota.

Na abordagem de duas etapas, o RSA é decomposto nos subproblemas roteamento e alocação de espectro, que são resolvidos sequencialmente. Para determinar o roteamento, Wan *et al.* (2011) utilizam o algoritmo *K-Shortest-Paths* - KSP, enquanto que Wang *et al.* (2011) estabelecem as rotas por balanceamento de carga pelo algoritmo *Balanced Load Spectrum Allocation* - BLSA, com objetivo de minimizar o uso de espectro da rede.

Após o roteamento, o subproblema de alocação de espectro em redes ópticas elásticas pode ser resolvido através de determinadas heurísticas, que são similares às utilizadas para resolver a atribuição de comprimento de onda em redes WDM tradicionais, dentre elas destacam-se:

- *Random-Fit* (RND): uma requisição de conexão é alocada em um ou mais *slots* de espectro disponíveis escolhidos aleatoriamente (Lins Júnior *et al.*, 2011);
- *First-Fit* (FF): os *slots* de frequência são indexados e é selecionada a primeira banda disponível com menor índice para alocar a conexão (Takagi *et al.*, 2011);
- *Best-Fit* (BF): faz-se uma busca em todo espaço espectral disponível e a conexão é alocada no menor bloco que satisfaça sua demanda (Wilson *et al.*, 1995).

Neste trabalho, estuda-se a alocação de espectro em um *link* de uma rede WDM flexível, no cenário dinâmico. Considera-se que as requisições de conexão são independentes e seguem uma distribuição de *Poisson*, e que os tempos médios de transmissão seguem uma distribuição exponencial e são independentes das chegadas de requisições de conexão. O sistema em estudo é modelado por um processo markoviano a tempo contínuo. Uma heurística para acomodação das requisições de conexão é proposta, e tem por objetivo minimizar a fragmentação de espectro. Esta heurística é comparada a outras encontradas na literatura aplicáveis ao problema.

O restante do trabalho é organizado da seguinte forma. Na Seção 2 descreve-se o modelo markoviano proposto para o problema em estudo. Na Seção 3 é apresentada a heurística proposta. As medidas de desempenho utilizadas para análise do sistema são descritas na Seção 4. Os resultados numéricos obtidos ao se implementar computacionalmente o modelo proposto são exibidos na Seção 5, e, na Seção 6, são apresentadas as considerações finais.

## 2. Modelo Markoviano

No presente trabalho modela-se a alocação de espectro em um *link* de uma rede WDM flexível como um processo markoviano a tempo contínuo sob condições de tráfego dinâmico.

Considera-se que o espectro óptico é dividido em  $N$  *slots* ( $N \in \mathbb{N}$ ) e as requisições de conexão que chegam ao *link* da rede são classificadas em  $K$  tipos distintos ( $K \in \mathbb{N}$ ). Cada tipo de requisição de conexão  $k$ , em que  $1 \leq k \leq K$ , é caracterizado por:

- $w_k$ : número de *slots* contíguos para acomodá-la, em que  $w_k \leq w_{k+1}$  para  $1 \leq k \leq K - 1$ , com  $w_k = \{1, 2, \dots\}$ ;
- $\lambda_k$ : taxa de chegada;
- $1/\mu_k$ : tempo médio de transmissão.

Admite-se que as chegadas de requisições de conexão do tipo  $k$  seguem uma distribuição de *Poisson* com taxa  $\lambda_k$  e é independente dos tempos de transmissão das conexões. O tempo de transmissão da  $i$ -ésima conexão do tipo  $k$  é exponencialmente distribuído com taxa  $\mu_{k_i}$ , em que  $i = \{1, 2, \dots, n\}$ , sendo  $n$  o número de conexões sendo transmitidas simultaneamente pelo *link* da rede. Adota-se o uso de bandas de guarda, que são representadas por  $g_b$ , em que  $g_b \in \{0, 1, 2, \dots\}$ .

O estado do sistema é representado por  $\{n, (s_1, k_1), (s_2, k_2), \dots, (s_n, k_n)\}$ , em que  $n$  é o número de conexões em andamento, e os pares ordenados  $(s_i, k_i)$  representam a posição do primeiro *slot* alocado para a  $i$ -ésima conexão e o tipo de desta requisição.

O espaço de estados  $E$  do sistema é definido por:

$$E = \{ \{n, (s_1, k_1), (s_2, k_2), \dots, (s_n, k_n)\} \mid n \geq 0; \begin{array}{l} 1 \leq k_i \leq K \text{ para } 1 \leq i \leq n; \\ s_1 \geq 1, s_n \leq N - w_{k_n}; \\ s_{i+1} \geq s_i + w_{k_i} + g_b \text{ para } 1 \leq i < n; \end{array} \}$$

As restrições do espaço de estado  $E$  asseguram que a posição do primeiro *slot* alocado para a  $i$ -ésima conexão deve levar em consideração o número de *slots* contíguos utilizados para sua acomodação e para as demais transmissões em andamento, além dos *slots* de banda de guarda.

Na Figura 3 apresenta-se um exemplo de alocação de espectro em um *link* de uma rede WDM flexível, que possui o espectro óptico dividido em 20 *slots*. O estado do sistema neste instante é representado por  $e = \{6, (1,1), (3,3), (8,2), (11,1), (15,1), (18,3)\}$ .

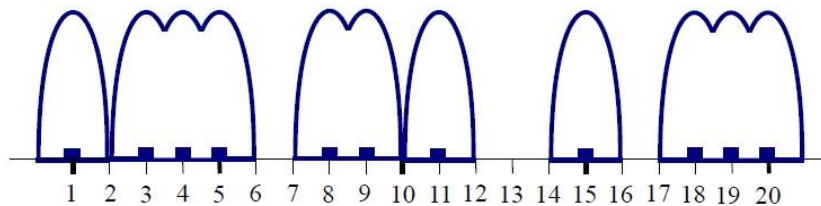


Figura 3 – Exemplo de alocação de espectro em um *link* de uma rede FWDM

Considera-se que as mudanças de estado no sistema ocorrem em instantes de chegada de requisição de uma nova conexão ou em instantes de término de uma determinada transmissão em andamento. Quando ocorre a chegada de uma nova requisição de conexão do tipo  $k$ , esta será transmitida se houver espaço espectral livre e contíguo que a comporte, além dos *slots* de banda de guarda necessários.

O conjunto de *slots* livres no espaço espectral para alocar uma nova requisição de conexão do tipo  $k$  que chega ao *link* da rede é dado por:

$$\Phi_e(k) = \{p \in \{1, 2, \dots, N\} \mid \phi_e(p) \geq w_k\}$$

em que  $p$  corresponde aos *slots* do espectro óptico.

Os elementos do conjunto  $\Phi_e(k)$  são obtidos a partir da função  $\phi_e(p)$ , que verifica, dentre todos os *slots* de espectro, quais posições estão livres, respeitando os *slots* de banda de guarda entre as transmissões e a restrição de continuidade de espectro. Dessa forma, tem-se:

$$\Phi_e(p) = \begin{cases} N - p + 1 & \text{se } n = 0 \text{ ou se } n > 0 \text{ e } p > s_n + w_{k_n} + g_b - 1 \\ s_1 - g_b - p & \text{se } n > 0 \text{ e } p < s_1 - g_b \\ s_i - g_b - p & \text{se } n > 0 \text{ e } \exists i \in \{2, \dots, N\} \\ & \text{tal que } s_{i-1} + w_{k_{i-1}} + g_b \leq p < s_i - g_b \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Uma heurística de alocação de conexões é uma função  $h: E \times K \rightarrow \Phi_e(k) \cup \{0\}$  que, para cada estado  $e \in E$ , atribui uma posição  $h_e(k) \in \Phi_e(k)$  dentre o conjunto  $\Phi_e(k)$  de posições possíveis para acomodar uma nova requisição de conexão do tipo  $k$ . Se não há espaço espectral disponível para acomodar essa requisição de conexão, ou seja, se  $\Phi_e(k) = \emptyset$ , atribui-se o valor zero.

Na Tabela 1 apresentam-se as transições possíveis entre os estados do modelo, dado que o sistema encontra-se no estado  $e = (n, (s_1, k_1), (s_2, k_2), \dots, (s_n, k_n)) \in E$ . Se o evento ocorrido for a chegada de uma nova requisição de conexão do tipo  $k$ , em que  $1 \leq k \leq K$ , uma heurística  $H$ , caracterizada pela função  $h_e(k)$ , é utilizada para sua alocação.

Tabela 1 – Transições entre estados do sistema

Evento	Condição	Próximo Estado	Taxa
Chegada de requisição do tipo $k$ ( $1 \leq k \leq K$ )	$h_e(k) \neq 0$ e $h_e(k) < s_1$	$(n + 1, (h_e(k), k), (s_1, k_1), \dots, (s_n, k_n))$	$\lambda_k$
	$h_e(k) \neq 0$ e $s_i < h_e(k) < s_{i+1}$	$(n + 1, (s_1, k_1), \dots, (s_i, k_i), (h_e(k), k), (s_{i+1}, k_{i+1}), \dots, (s_n, k_n))$	
	$h_e(k) \neq 0$ e $h_e(k) > s_n$	$(n + 1, (s_1, k_1), (s_2, k_2), \dots, (s_n, k_n), (h_e(k), k))$	
Término da $i$ -ésima transmissão ( $1 \leq i \leq n$ )	$n > 0$	$(n - 1, (s_1, k_1), \dots, (s_{i-1}, k_{i-1}), (s_{i+1}, k_{i+1}), \dots, (s_n, k_n))$	$\mu_{k_i}$

Se o sistema está no estado  $e = (n, (s_1, k_1), (s_2, k_2), \dots, (s_n, k_n)) \in E$ , quando uma requisição de conexão é aceita, ela deve ser adicionada ao sistema. Se, por exemplo, a heurística  $H$  determina acomodá-la antes da conexão que está alocada na posição  $s_1$ , o estado do sistema passa a ser:

$$e' = (n', (s'_1, k'_1), \dots, (s'_n, k'_n)) = (n + 1, (h_e(k), k), (s_1, k_1), \dots, (s_n, k_n))$$

Neste caso, o sistema permanece no estado  $e' \in E$  até que um próximo evento ocorra. Se a chamada é rejeitada, não acontece mudança de estado.

Ainda, a partir do estado  $e = (n, (s_1, k_1), (s_2, k_2), \dots, (s_n, k_n)) \in E$ , se o evento ocorrido for o término do processamento de uma  $i$ -ésima conexão, a chamada é removida do sistema, e este passa para o estado:

$$e' = (n', (s'_1, k'_1), \dots, (s'_n, k'_n)) = (n - 1, (s_1, k_1), \dots, (s_{i-1}, k_{i-1}), (s_{i+1}, k_{i+1}), \dots, (s_n, k_n))$$

### 3. Fragmentação e Heurística *Frag-Min*

Em redes ópticas elásticas, a dinâmica de alocação de recurso espectral para novas requisições e sua liberação ao término da transmissão provocam a criação de “buracos” entre os *slots* alocados para as transmissões correntes. Se esses “buracos” são pequenos e numerosos, eles podem não satisfazer futuras requisições que necessitam de blocos maiores que estes para sua alocação, provocando o aumento de rejeição de requisições de conexão. É importante que seja evitada ao máximo a criação desses blocos vazios entre os *slots* sendo utilizados para a transmissão das conexões. Este problema é conhecido como fragmentação e pode influenciar diretamente a eficiência destas redes (Wilson *et al.*, 1995).

Existem diversas formas de quantificar a fragmentação de espectro em redes ópticas elásticas. Uma dessas medidas é denotada a seguir na Equação 1, inspirada nos trabalhos de Caulier (2004; 2011):

$$frag = \frac{f^2}{\sum fi^2}, \quad (1)$$

em que para cada estado  $i \in E$  do sistema,  $f \in \mathbb{N}$  é o número total de *slots* livres, e  $fi \in \mathbb{N}$  é o tamanho (número de *slots* contíguos) de cada bloco de espectro livre. Essa medida de fragmentação foi utilizada no desenvolvimento da heurística proposta, e não considera os *slots* de banda de guarda como *slots* reservados.

A heurística, proposta no presente trabalho, para atribuição de espectro em redes flexíveis é denominada *Frag-Min* e funciona como uma estratégia para minimizar a fragmentação de espectro durante a alocação das conexões. Nesta heurística, quando uma nova requisição de conexão chega ao *link* da rede e pode ser aceita, ela é alocada na posição de espectro cujo estado resultante após sua acomodação apresente o menor valor de fragmentação dado pela Equação 1.

### 4. Medidas de desempenho

As seguintes medidas de desempenho são utilizadas para analisar o comportamento do sistema: taxa de processamento e transmissão de dados (*throughput*) das requisições, probabilidade de bloqueio (rejeição) das requisições de conexão no *link* da rede e média de fragmentação de espectro.

O *throughput* das requisições do tipo  $k$  ( $T_k$ ) é obtido considerando o número de conexões desta classe em cada estado  $i \in E$  ( $n_{i_k}$ ), multiplicado pela probabilidade limite  $\pi_i$  do mesmo, e pela taxa de transmissão  $\mu_k$  destas requisições:

$$T_k = \sum_{i \in E} n_{i_k} \pi_i \mu_k$$

As probabilidades limite  $\pi_i$  (Ross, 1995) podem ser interpretadas como a fração do tempo que o sistema permanece no estado  $i \in E$ .

A probabilidade de bloqueio ( $PB_k$ ) das requisições de conexão do tipo  $k$  é dada por:

$$PB_k = 1 - \frac{T_k}{\lambda_k},$$

em que  $T_k$  corresponde ao *throughput* das transmissões das requisições do tipo  $k$  e  $\lambda_k$  é a taxa de chegada destas.

Similarmente, considerando todos os tipos de conexões, tem-se o *throughput* total do *link*:

$$T = \sum_{k=1}^K T_k$$

A probabilidade de bloqueio de requisições do *link* é:

$$PB = 1 - \frac{T}{\sum_{k=1}^K \lambda_k}$$

A média de fragmentação de espectro é calculada pela multiplicação de *frag* (Equação 1) pela probabilidade limite  $\pi_i$  de cada estado  $i \in E$  do sistema.

## 5. Resultados numéricos

O modelo proposto foi implementado em linguagem C++, utilizando a biblioteca Modelagem Estocástica (MODESTO), desenvolvida no Laboratório Associado de Matemática e Computação Aplicada (LAC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Os resultados numéricos foram obtidos por meio da heurística proposta *Frag-Min*, comparada com outras três heurísticas para alocação de espectro: *Random-Fit*, *First-Fit* e *Best-Fit*. Considerou-se que o *link* da rede WDM flexível possui o espectro óptico dividido em 20 *slots* e utiliza um *slot* de banda de guarda entre as transmissões simultâneas.

Na execução dos testes, admitiu-se que três tipos diferentes de requisições de conexão (1, 2 e 3) chegam ao *link*, exigindo, respectivamente, 1, 2 ou 3 *slots* contíguos. Supõe-se que as taxas de transmissão das conexões são iguais, ou seja,  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 1$ , e as taxas de chegadas das requisições variam.

Na Tabela 2 apresentam-se as probabilidades de bloqueio para cada tipo de requisição de conexão, considerando-se que as taxas de chegadas são homogêneas. As probabilidades de bloqueio aumentam de acordo com a quantidade de *slots* contíguos que cada tipo de requisição requer. A heurística *Frag-Min*, em termos de probabilidade de bloqueio de todas as requisições, apresenta melhor desempenho que as outras heurísticas testadas.

Tabela 2 – Probabilidades de bloqueio de requisições com taxas de chegadas homogêneas

Taxa de chegada	Tipo	<i>Random-Fit</i>	<i>First-Fit</i>	<i>Best-Fit</i>	<i>Frag-Min</i>
1	1	0,01605	0,01439	0,01584	0,01579
	2	0,06398	0,04431	0,04271	0,04101
	3	0,13709	0,08979	0,08264	0,07684
	1, 2 e 3	<b>0,07237</b>	<b>0,04950</b>	<b>0,04706</b>	<b>0,04455</b>

As taxas de chegadas heterogêneas consideradas e as probabilidades de bloqueio para cada tipo de requisição são apresentadas na Tabela 3. Requisições que utilizam mais *slots* contíguos e chegam ao *link* com mais frequência possivelmente serão as mais rejeitadas, pois demandam mais recursos que as outras. *Frag-Min* apresenta menor probabilidade de bloqueio de requisições de todo o *link* quando comparada as demais heurísticas testadas.



Tabela 3 – Probabilidades de bloqueio de requisições com taxas de chegadas heterogêneas

Taxa de chegada	Tipo	<i>Random-Fit</i>	<i>First-Fit</i>	<i>Best-Fit</i>	<i>Frag-Min</i>
1	1	0,10187	0,10262	0,11542	0,11660
2	2	0,27088	0,23916	0,23825	0,23727
3	3	0,43020	0,39546	0,38136	0,37370
	1, 2 e 3	<b>0,32237</b>	<b>0,29455</b>	<b>0,28933</b>	<b>0,28537</b>

A média de fragmentação para cada heurística, apresentada na Tabela 4, é obtida considerando todas as taxas de chegadas de requisições de conexão.

Tabela 4 – Média de fragmentação

Taxas de chegada	<i>Random-Fit</i>	<i>First-Fit</i>	<i>Best-Fit</i>	<i>Frag-Min</i>
1, 1 e 1	2,523	2,108	2,030	1,761
1, 2 e 3	3,277	3,120	3,030	2,740

Ao analisar a fragmentação, a heurística *Frag-Min* supera todas as outras heurísticas consideradas nos testes realizados, apresentando menor probabilidade de rejeição de requisições, o que significa aumento do *throughput* e redução do desperdício de espectro.

## 6. Conclusões

No presente trabalho, um modelo markoviano foi utilizado para estudar o subproblema de alocação de espectro em um *link* de uma rede WDM flexível sob condições de tráfego dinâmico, e uma heurística foi proposta para a acomodação de requisições de conexão nestas redes.

A heurística proposta é baseada no conceito de fragmentação. Em várias áreas da Pesquisa Operacional, a otimização do uso de recursos limitados está relacionada com a minimização da fragmentação deste uso. Assim, buscou-se uma forma de quantificação da fragmentação que pudesse ser aplicada ao problema em estudo, a qual foi adicionada na heurística proposta, denominada *Frag-Min*. Os resultados de *Frag-Min* foram comparados com os de algumas heurísticas clássicas.

Por meio dos testes realizados, observou-se que, em ambos os casos de taxas de chegada de requisições homogêneas ou heterogêneas, a heurística proposta apresenta bons resultados.

Ao analisar as fragmentações obtidas por *Frag-Min* e pelas heurísticas clássicas, observa-se que existe uma forte relação entre estas e as probabilidades de bloqueio. Este fato é um incentivo para o prosseguimento da pesquisa.

Para trabalhos futuros, pretende-se estudar outras formas de mensurar a fragmentação de espectro e minimizá-la durante a alocação das conexões em redes ópticas elásticas, com o objetivo de aumentar a eficiência espectral e conseqüentemente, diminuir a rejeição de requisições de conexão.

## 7. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento com bolsa de mestrado, ao Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada (CAP) e ao Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada (LAC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

## Referências

- Caulier, J. F.**, On the Measurement of Fragmentation, *Hyper Articles en Ligne (HAL)*, versão 1, Université Paris I, 2010 (<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00633613/>), 10, 2011.
- Caulier, J. F. (2004)**, A Normative Measure of Fragmentation. *VII Summer School on Economics and Philosophy: The Design and Consequences of Constitutions*, San Sebastian, Espanha, 1-24.
- Choi, J. S., Lee, H. H.** (1998), A Dynamic Wavelength Allocation Scheme with Status Information for Fixed- and Variable-Length Messages. *Global Telecommunications Conference 2010*, Sidney, NSW, 2358-2362.
- Christodoulopoulos, K., Tomkos, I. e Varvarigos, E. A.** (2010), Routing and Spectrum Allocation in OFDM-based Optical Networks with Elastic Bandwidth Allocation. *Global Telecommunications Conference 2010*, Miami, Flórida, 1-6.
- Gerstel, O., Jinno, M., Lord, A. e Yoo, S. J. B.** (2012), Elastic Optical Networking: a New Dawn for the Optical Layer?. *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, s12- s20.
- Jinno, M., Kozicki, B., Takara, H., Watanabe, A., Sone, Y., Tanaka, T. e Hirano, A.** (2010), Distance-adaptive Spectrum Resource Allocation in Spectrum-sliced Elastic Optical Path Network. *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, 138-145.
- Jinno, M., Takara, H., Kozicki, B., Tsukishima, Y., Sone, Y. e Matsuoka, S.** (2009), Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies. Concept and Enabling Technologies of Spectrum-Sliced Elastic Optical Network (SLICE). *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, 66-73.
- Lins Júnior, P. R., Barros, M. T. e Alencar, M. S.** (2011), Performance of Wavelength Assignment Heuristics in a Dynamic Optical Network with Adaptive Routing and Traffic Grooming. *Int. Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC) 2011*, Natal, Rio Grande do Norte, 435-439. ISBN 978-1-4577-1662-1.
- Mukherjee, B.** (2000), WDM Optical Communication Networks: Progress and Challenged. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, no. 10, 1810- 1824.
- Norouzi, A., Zaim, A. H. e Ustundag, B. B.** (2011), An Integrated Survey in Optical Networks: Concepts, Components and Problems. *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)*, vol. 11, no. 1, 10- 26.
- Patel, A. N., Ji, P. N., Jue, J. P. e Wang, T.** (2010), Routing, Wavelength Assignment, and Spectrum Allocation in Transparent Flexible Optical WDM (FWDM) Networks. *Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics and Photonics in Switching 2010*, Monterey, CA. Optical Society of America, paper PDPWG1.
- Ross, S. M.** *Stochastic Processes*. New York: John Wiley & Sons. 2a. ed, 1995.
- Takagi, T., Hasegawa, H., Sato, K., Sone, Y., Kozicki, B., Hirano, A., Jinno, M.** (2011) Dynamic Routing and Frequency Slot Assignment for Elastic Optical Path Networks that Adopt Distance Adaptive Modulation. *OFC/NFOEC 2011*, Los Angeles, CA, 1-3.
- Wan, X., Wang, L., Hua, N., Zhang, H. e Zheng, X.** (2011), Dynamic Routing and Spectrum Assignment in Flexible Optical Path Networks. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition*, 2011, Los Angeles, CA, 1-3.
- Wang, Y., Cao, X. e Pan, Y.** (2011), A Study of the Routing and Spectrum Allocation in Spectrum-sliced Elastic Optical Path Networks. *INFOCOM 2011*, Shanghai, China, 1503- 1511.
- Wilson, P. R., Johnstone, M. S., Neely M. e Boles, D.** (1995), Dynamic Storage Allocation: A Survey and Critical Review. *International Workshop on Memory Management 1995*, London, UK. 1-116.
- Zang, H., Jue, J. P. e Mukherjee, B.** (2000), A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks. *Optical Networks Magazine*, 47-60.