



20 e 21 de outubro
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
São José dos Campos - SP

Modelo Markoviano de um Nó para o Roteamento Adaptativo em Redes WDM Totalmente Ópticas

Luis F. A. França¹, Solon V. de Carvalho², Rita C. M. Rodrigues²

¹Programa de Mestrado em Computação Aplicada – CAP, INPE

²Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada - LAC
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE – São José dos Campos, SP – Brasil

lfamorim@gmail.com, {solon,rita}@lac.inpe.br

Abstract. *Wavelength Division Multiplexing (WDM) optical networks are being used to meet the growing demand for greater bandwidth, as they leverage better the capacity of fiber optics. When electrical-optical conversions are not necessary to the transmission of data between network nodes, the network is called transparent or all-optical. The problem of determining the route and the allocation of wavelengths needed for the construction of optical paths (lightpaths) between a source-destination pair is called routing and wavelength assignment (RWA), commonly divided into two sub problems: routing and wavelength assignment. In this paper, we study the adaptive routing sub problem at an all-optical WDM network's node modeling it as a continuous time Markov decision process.*

Resumo. *As redes ópticas Wavelength Division Multiplexing (WDM) vêm sendo utilizadas para atender a crescente demanda por uma maior largura de banda, visto que aproveitam melhor a capacidade das fibras ópticas. Quando não são realizadas conversões óptico-elétricas na transmissão de dados entre os nós da rede, esta passa a ser denominada transparente ou totalmente óptica. O problema de determinar a rota e a atribuição de comprimentos de onda necessários para a construção dos caminhos ópticos (lightpaths) entre um par origem-destino é denominado routing and wavelength assignment (RWA), comumente dividido em dois subproblemas: roteamento e atribuição de comprimento de onda. Neste trabalho, estuda-se o subproblema de roteamento adaptativo em um nó de uma rede WDM totalmente óptica modelando-o como um processo markoviano de decisão a tempo contínuo.*

Palavras-chave: *Redes WDM, Processo Markoviano de Decisão, Roteamento Adaptativo.*

1. Introdução

A popularização da internet e o aumento na troca de dados entre usuários por meio de tráfego de voz, vídeos em alta definição, compartilhamento de arquivos, jogos online, entre outros, causaram um aumento na demanda por uma maior largura de banda. A tecnologia de fibra óptica vem sendo utilizada para suprir essa necessidade, já que a mesma possui capacidade de transmissão na ordem de terabits por segundo. A transmissão por parte dos clientes e aplicações, no entanto, é limitada pelo uso de equipamentos eletrônicos com taxas na ordem de gigabits por segundo, gerando uma grande incompatibilidade [Sivalingam e Subramaniam, 2000].

Uma solução encontrada é possibilitar que mais de um usuário utilize a rede concorrentemente por meio da Multiplexação por Divisão em Comprimento de Onda (*Wavelength Division Multiplexing* - WDM), abordagem em que cada cliente (transmissor) passa a utilizar um determinado comprimento de onda w , como mostra a Figura 1. Estes comprimentos de onda são multiplexados e colocados em uma fibra, e quando chegam ao destino são demultiplexados e encaminhados para os diferentes receptores.

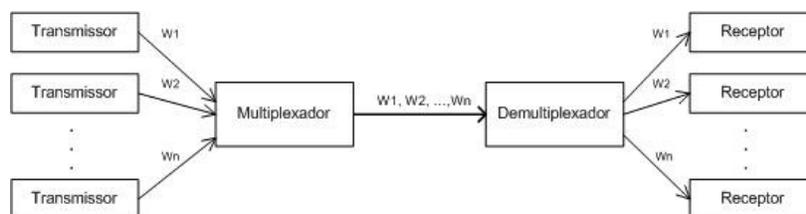


Figura 1 - Wavelength Division Multiplexing – WDM (Adaptado de Maier, 2008)

Nas redes WDM, conversões óptico-elétricas devem ser feitas quando o sinal passa por nós intermediários na transmissão de dados entre um par origem-destino, visto que estes nós processam os sinais eletricamente. Tais conversões são custosas e representam um gargalo na transmissão, e, para evitá-las, dispositivos capazes de manter a comutação dos comprimentos de onda no domínio óptico, chamados *Optical Cross Connects* (OXCs), podem ser instalados em cada nó, fazendo com que a rede passe a ser denominada transparente ou totalmente óptica [Maier, 2008].

O caminho óptico para comunicação entre um par origem-destino nas redes WDM é denominado *lightpath*. Tal caminho deve utilizar sempre o mesmo comprimento de onda em todos os saltos (*hops*), restrição denominada *wavelength continuity constraint*. No entanto, essa restrição pode ser contornada utilizando-se conversores de comprimento de onda nos nós da rede.

Dado um conjunto de requisições de conexão, o problema de se determinar a rota e a atribuição dos comprimentos de onda necessários para a construção dos *lightpaths* é denominado *routing and wavelength assignment* (RWA) [Ramaswami e Sivarajan, 1995]. Se uma boa solução para esse problema é encontrada, tem-se a garantia de que mais clientes serão atendidos, e, conseqüentemente, menos chamadas serão rejeitadas.

Devido à sua complexidade, o problema RWA comumente é dividido em dois subproblemas: roteamento e atribuição de comprimento de onda, que são tratados separadamente.

Os algoritmos de roteamento podem ser divididos, de acordo com Zang et al. (2000), em três classes básicas: 1) fixos, 2) fixos alternados, e 3) adaptativos. Na primeira abordagem a mesma rota é sempre escolhida para um determinado par origem-destino. No roteamento fixo alternado, cada nó da rede mantém uma tabela de roteamento com uma lista ordenada de rotas fixas para cada nó destino. Já na última classe, a escolha da rota para um par origem-destino é feita dinamicamente, dependendo do estado atual da rede.

Para o subproblema de atribuição de comprimento de onda algumas heurísticas foram propostas na literatura, como *Random Wavelength Assignment*, *First-Fit*, *Most-Used* e *Least-Used* [Zang et al., 2000; Pezoulas et al. 2003].

Quando o tráfego de conexões da rede estudada é dinâmico, ou seja, as decisões de roteamento e atribuição de comprimento de onda devem ser tomadas na chegada de cada requisição, a modelagem markoviana pode ser utilizada para resolução do problema RWA. Nesse contexto, vários trabalhos podem ser encontrados na literatura, entre estes citam-se os trabalhos de Mosharaf et al. (2003), Tachibana et al. (2007), e Rosa et al. (2009), que abordam sistemas semelhantes ao estudado no presente trabalho.

No trabalho de Mosharaf et al. (2003), investiga-se o problema de atribuição de comprimentos de onda em redes WDM para diferentes classes de usuários, com prioridades diferentes. Para tanto, utiliza-se um Processo Markoviano de Decisão (PMD) para modelar um nó da rede com o objetivo de encontrar uma política ótima de atribuição de comprimento de onda.

Tachibana et al. (2007) baseia-se na política ótima de um PMD para propor um método de estabelecimento dinâmico de *lightpaths* em uma rede WDM com conversores de comprimento de onda, levando em conta a diferenciação dos serviços.

Rosa et al. (2009), por sua vez, utilizam um PMD para modelar uma rede WDM totalmente óptica em uma topologia de anel unidirecional. O objetivo é obter políticas de atribuição de comprimento de onda e controle justo da rede, ou seja, políticas que determinem a distribuição dos recursos da rede de maneira igualitária entre as chamadas.

Neste trabalho, investiga-se o problema de roteamento adaptativo em um nó de uma rede WDM totalmente óptica, bidirecional, e com diferentes classes de usuários, modelando-o como um processo markoviano de decisão. Vale ressaltar que se considera a existência de conversor de comprimento de onda no nó. O objetivo é encontrar uma política ótima para o roteamento de chamadas provenientes desse nó, de maneira que se maximize o número médio de canais utilizados.

O restante do trabalho é organizado da seguinte forma. Na seção 2 descrevem-se, brevemente, o problema em estudo e o modelo markoviano de decisão do nó proposto neste trabalho. Na seção 3 são apresentados os resultados numéricos obtidos ao se testar o modelo formulado. As considerações finais e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas na Seção 4.

2. Modelo Markoviano do Nó

Considera-se um conjunto de nós em uma topologia de anel bidirecional, como mostra a Figura 2. Tal topologia pode ser vista como dois anéis, um no sentido horário e outro no

anti-horário, em que cada nó representa um cliente da rede: uma empresa, uma universidade, uma antena distribuidora, entre outros. Esses clientes geram requisições de conexão para que seus dados sejam transportados na rede até um destino desejado, assim como roteiam as chamadas provenientes de outros nós para que estas cheguem aos seus respectivos destinos.

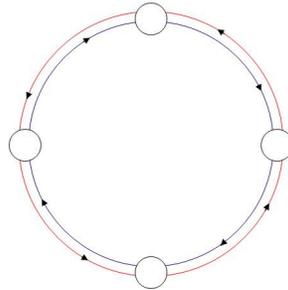


Figura 2 – Anel Bidirecional

No presente trabalho modela-se um dos nós da rede bidirecional como um processo markoviano de decisão a tempo contínuo, baseando-se no modelo proposto por Mosharaf et al. (2003) e discutido por Rosa et al. (2009).

As requisições de conexão (chamadas) relacionadas ao nó são divididas em classes distintas, como mostra a Figura 3. A classe 1 corresponde às chamadas que chegam ao nó, a classe 2 referencia as chamadas que passam pelo nó, enquanto a classe 3 compreende as chamadas originadas no nó. Como trata-se de um anel bidirecional, tais classes são divididas em relação ao sentido em que são transmitidas: horário (1H, 2H e 3H) ou anti-horário (1A, 2A e 3A).

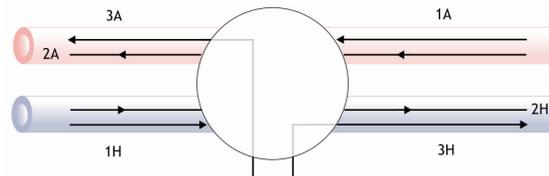


Figura 3 - Representação das classes de um nó do anel

Admite-se que as chegadas de chamadas em cada classe seguem uma distribuição de *Poisson*, e suas taxas são representadas por λ_{cH} , λ_{cA} , e λ_3 , com $c \in \{1, 2\}$. Vale ressaltar que λ_3 é a taxa de requisições originadas no nó, e apenas quando (se) estas forem roteadas em um dos sentidos elas passam a pertencer às classes 3H ou 3A. O tempo de processamento das chamadas de cada classe tem, por hipótese, distribuição exponencial, e suas taxas são dadas por μ_{cH} e μ_{cA} , com $c \in \{1, 2, 3\}$.

A quantidade total de comprimentos de onda no anel óptico no sentido horário e anti-horário é dada, respectivamente, por W_H e W_A . O número de comprimentos de onda utilizados por cada classe no estado atual do sistema é representado por n_{cH} e n_{cA} , com $c \in \{1, 2, 3\}$. Dessa forma, a quantidade de chamadas no sistema na entrada do nó (a soma de n_{1H} e n_{2H}) e na saída (a soma de n_{2H} e n_{3H}), no sentido horário, não deve

exceder o número total de comprimentos de onda do anel nesse sentido (WH). O mesmo vale para o sentido anti-horário.

Cada estado do sistema é dado pelo conjunto $\{n_{1H}, n_{1A}, n_{2H}, n_{2A}, n_{3H}, n_{3A}, ev\}$, em que ev corresponde ao último evento ocorrido. Este evento pode ser a chegada de uma chamada de determinada classe, dado por a_{cH}, a_{cA} e a_3 com $c \in \{1, 2\}$, ou o término de processamento de uma chamada de determinada classe, representado por s_{cH} e s_{cA} , com $c \in \{1, 2, 3\}$. Os eventos do tipo s_{cH} e s_{cA} só podem ocorrer quando existe ao menos uma chamada da classe em questão no sistema. Dessa forma, o espaço de estados S é definido por:

$$S = \{ \{n_{1H}, n_{1A}, n_{2H}, n_{2A}, n_{3H}, n_{3A}, ev\} \mid \begin{aligned} &0 \leq n_{cH} \leq WH, 0 \leq n_{cA} \leq WA, \text{ com } c \in \{1, 2, 3\}, \\ &ev = \{a_{1H}, a_{1A}, a_{2H}, a_{2A}, a_3, s_{1H}, s_{1A}, s_{2H}, s_{2A}, s_{3H}, s_{3A}\}, \\ &n_{1H} + n_{2H} \leq WH, n_{2H} + n_{3H} \leq WH, \\ &n_{1A} + n_{2A} \leq WA, n_{2A} + n_{3A} \leq WA, \\ &\text{se } n_{1H} = 0 \text{ então } ev \neq s_{1H}, \\ &\text{se } n_{1A} = 0 \text{ então } ev \neq s_{1A}, \\ &\text{se } n_{2H} = 0 \text{ então } ev \neq s_{2H}, \\ &\text{se } n_{2A} = 0 \text{ então } ev \neq s_{2A}, \\ &\text{se } n_{3H} = 0 \text{ então } ev \neq s_{3H}, \\ &\text{se } n_{3A} = 0 \text{ então } ev \neq s_{3A} \end{aligned} \}$$

Admite-se que uma decisão deve ser tomada logo após a ocorrência de um evento: chegada ou término de processamento de uma chamada. As ações possíveis são: aceitação de uma chamada no sentido horário (ACCH) ou anti-horário (ACCA), rejeição de uma chamada (REJ), ou nenhuma ação (NOA).

Como o objetivo do modelo é otimizar o roteamento adaptativo, quando a chegada de uma chamada da classe 3 ocorre, deve-se decidir sua aceitação e roteamento para o sentido horário ou anti-horário do anel, ou sua rejeição. Desta forma, mesmo que haja comprimentos de onda disponíveis para atender essa chamada, ela pode ser rejeitada.

Em relação aos eventos a_{cH} e a_{cA} , com $c \in \{1, 2\}$, se houver recursos suficientes na rede para atendê-los, eles serão obrigatoriamente aceitos. Ressalta-se que as chamadas da classe 2 só podem ser aceitas quando houver comprimentos de onda disponíveis tanto na entrada quanto na saída do nó em questão. Por fim, quando ocorrem eventos de término de processamento de uma chamada, esta sai do sistema e nenhuma decisão é tomada, adotando-se a ação NOA. A Figura 4 ilustra as ações possíveis para cada estado de S .

Após a observação do estado $i \in S$ e a escolha da ação $a \in A(i)$, o sistema evolui para um estado reagido $i' = \{y_{1H}, y_{1A}, y_{2H}, y_{2A}, y_{3H}, y_{3A}\}$, em que y_{cH} é o número de comprimentos de onda utilizados pela classe c no sentido horário, e y_{cA} o número de comprimentos de onda utilizados pela classe c no sentido anti-horário, com $c \in \{1, 2, 3\}$. Este estado reagido é o resultado imediato da ação escolhida, e o sistema permanece nele até que o próximo evento ocorra, como é apresentado na Tabela 1.

$$A(i) = \left\{ \begin{array}{l} \{ACCH\} se \quad \left\{ \begin{array}{l} ev = a_{1H} \wedge n_{1H} + n_{2H} < WH \quad \vee \\ ev = a_{2H} \wedge (n_{1H} + n_{2H} < WH \wedge n_{2H} + n_{3H} < WH) \end{array} \right. \\ \\ \{ACCA\} se \quad \left\{ \begin{array}{l} ev = a_{1A} \wedge n_{1A} + n_{2A} < WA \quad \vee \\ ev = a_{2A} \wedge (n_{1A} + n_{2A} < WA \wedge n_{2A} + n_{3A} < WA) \end{array} \right. \\ \\ \{ACCH, REJ\} se \quad \left\{ ev = a_3 \wedge (n_{2H} + n_{3H} < WH \wedge n_{2A} + n_{3A} = WA) \right. \\ \\ \{ACCA, REJ\} se \quad \left\{ ev = a_3 \wedge (n_{2H} + n_{3H} = WH \wedge n_{2A} + n_{3A} < WA) \right. \\ \\ \{ACCA, ACCH, REJ\} se \quad \left\{ ev = a_3 \wedge (n_{2H} + n_{3H} < WH \wedge n_{2A} + n_{3A} < WA) \right. \\ \\ \{REJ\} se \quad \left\{ \begin{array}{l} ev = a_{1H} \wedge n_{1H} + n_{2H} = WH \quad \vee \\ ev = a_{1A} \wedge n_{1A} + n_{2A} = WA \quad \vee \\ ev = a_{2H} \wedge (n_{1H} + n_{2H} = WH \vee n_{2H} + n_{3H} = WH) \quad \vee \\ ev = a_{2A} \wedge (n_{1A} + n_{2A} = WA \vee n_{2A} + n_{3A} = WA) \quad \vee \\ ev = a_3 \wedge (n_{2H} + n_{3H} = WH \wedge n_{2A} + n_{3A} = WA) \end{array} \right. \\ \\ \{NOA\} se \quad \left\{ ev = S_{cH} \vee ev = S_{cA} \text{ com } c \in \{1, 2, 3\} \right. \end{array} \right.$$

Figura 4 – Espaço de Ações

Tabela 1 – Estados Reagidos

| Último Evento | Ação | Estado Reagido |
|--|------|--|
| a_{1H} | ACCH | $\{n_{1H} + 1, n_{1A}, n_{2H}, n_{2A}, n_{3H}, n_{3A}\}$ |
| a_{1A} | ACCA | $\{n_{1H}, n_{1A} + 1, n_{2H}, n_{2A}, n_{3H}, n_{3A}\}$ |
| a_{2H} | ACCH | $\{n_{1H}, n_{1A}, n_{2H} + 1, n_{2A}, n_{3H}, n_{3A}\}$ |
| a_{2A} | ACCA | $\{n_{1H}, n_{1A}, n_{2H}, n_{2A} + 1, n_{3H}, n_{3A}\}$ |
| a_3 | ACCH | $\{n_{1H}, n_{1A}, n_{2H}, n_{2A}, n_{3H} + 1, n_{3A}\}$ |
| a_3 | ACCA | $\{n_{1H}, n_{1A}, n_{2H}, n_{2A}, n_{3H}, n_{3A} + 1\}$ |
| s_{1H} | NOA | $\{n_{1H} - 1, n_{1A}, n_{2H}, n_{2A}, n_{3H}, n_{3A}\}$ |
| s_{1A} | NOA | $\{n_{1H}, n_{1A} - 1, n_{2H}, n_{2A}, n_{3H}, n_{3A}\}$ |
| s_{2H} | NOA | $\{n_{1H}, n_{1A}, n_{2H} - 1, n_{2A}, n_{3H}, n_{3A}\}$ |
| s_{2A} | NOA | $\{n_{1H}, n_{1A}, n_{2H}, n_{2A} - 1, n_{3H}, n_{3A}\}$ |
| s_{3H} | NOA | $\{n_{1H}, n_{1A}, n_{2H}, n_{2A}, n_{3H} - 1, n_{3A}\}$ |
| s_{3A} | NOA | $\{n_{1H}, n_{1A}, n_{2H}, n_{2A}, n_{3H}, n_{3A} - 1\}$ |
| $a_{cH} \vee a_{cA} \vee a_3, \text{ com } c \in \{1, 2\}$ | REJ | $\{n_{1H}, n_{1A}, n_{2H}, n_{2A}, n_{3H}, n_{3A}\}$ |

Tomando como exemplo um estado $i = \{n_{1H}, n_{1A}, n_{2H}, n_{2A}, n_{3H}, n_{3A}, ev\}$ em que ev é uma chegada da classe 1H ($e = a_{1H}$), se esta chamada for aceita ($a = ACCH$), ela é incorporada ao sistema, e este passa para o estado reagido $i' = \{n_{1H} + 1, n_{1A}, n_{2H}, n_{2A}, n_{3H}, n_{3A}\}$ até que o próximo evento ocorra. Em caso de rejeição da chamada ($a = REJ$), não há mudança no estado. Se ev é o término de processamento de uma chamada da classe 1H ($ev = s_{1H}$), nenhuma ação é tomada ($a = NOA$), a chamada é retirada do sistema, e este passa para o estado reagido $i' = \{n_{1H} - 1, n_{1A}, n_{2H}, n_{2A}, n_{3H}, n_{3A}\}$.

A partir do estado reagido i' , a taxa de transição para o próximo estado $j \in S$ varia de acordo com a ocorrência do próximo evento no sistema, podendo ser obtida de acordo com a Tabela 2. Utilizando-se o estado reagido $i' = \{n_{1H} + 1, n_{1A}, n_{2H}, n_{2A}, n_{3H}, n_{3A}\}$ como exemplo, e supondo-se que o próximo evento seja uma chegada da classe 2H (a_{2H}), a taxa de transição para o próximo estado é λ_{2H} , e o estado do sistema passa a ser $j = \{n_{1H} + 1, n_{1A}, n_{2H}, n_{2A}, n_{3H}, n_{3A}, a_{2H}\}$.

Tabela 2 – Taxas de Transição

| Próximo Evento | Taxa de Transição | Próximo Estado |
|----------------|-------------------|--|
| a_{1H} | λ_{1H} | $\{y_{1H}, y_{1A}, y_{2H}, y_{2A}, y_{3H}, y_{3A}, a_{1H}\}$ |
| a_{1A} | λ_{1A} | $\{y_{1H}, y_{1A}, y_{2H}, y_{2A}, y_{3H}, y_{3A}, a_{1A}\}$ |
| a_{2H} | λ_{2H} | $\{y_{1H}, y_{1A}, y_{2H}, y_{2A}, y_{3H}, y_{3A}, a_{2H}\}$ |
| a_{2A} | λ_{2A} | $\{y_{1H}, y_{1A}, y_{2H}, y_{2A}, y_{3H}, y_{3A}, a_{2A}\}$ |
| a_3 | λ_3 | $\{y_{1H}, y_{1A}, y_{2H}, y_{2A}, y_{3H}, y_{3A}, a_3\}$ |
| s_{1H} | $\mu_{1H} n_{1H}$ | $\{y_{1H}, y_{1A}, y_{2H}, y_{2A}, y_{3H}, y_{3A}, s_{1H}\}$ |
| s_{1A} | $\mu_{1A} n_{1A}$ | $\{y_{1H}, y_{1A}, y_{2H}, y_{2A}, y_{3H}, y_{3A}, s_{1A}\}$ |
| s_{2H} | $\mu_{2H} n_{2H}$ | $\{y_{1H}, y_{1A}, y_{2H}, y_{2A}, y_{3H}, y_{3A}, s_{2H}\}$ |
| s_{2A} | $\mu_{2A} n_{2A}$ | $\{y_{1H}, y_{1A}, y_{2H}, y_{2A}, y_{3H}, y_{3A}, s_{2A}\}$ |
| s_{3H} | $\mu_{3H} n_{3H}$ | $\{y_{1H}, y_{1A}, y_{2H}, y_{2A}, y_{3H}, y_{3A}, s_{3H}\}$ |
| s_{3A} | $\mu_{3A} n_{3A}$ | $\{y_{1H}, y_{1A}, y_{2H}, y_{2A}, y_{3H}, y_{3A}, s_{3A}\}$ |

Por fim, calcula-se o retorno esperado $R_i(a)$ ao se tomar a decisão $a \in A(i)$ quando o sistema está no estado $i \in S$. Para tanto, leva-se em conta a quantidade de chamadas sendo transmitidas pelo sistema no estado reagido i' , ponderada por pesos r_1 , r_2 e r_3 relacionados à prioridade de cada classe, tanto no sentido horário como no anti-horário. Em seguida, multiplica-se esse resultado pelo tempo esperado até o próximo instante de decisão, denotado por $\tau(i, a)$. Tem-se então:

$$R_i(a) = (y_{1H} + y_{1A})r_1 + (y_{2H} + y_{2A})r_2 + (y_{3H} + y_{3A})r_3 \tau(i, a)$$

em que $\tau(i, a)$ é dado por:

$$\tau(i, a) = \frac{1}{\sum_{j \in S} \lambda_{ij}(a)}$$

sendo $\lambda_{ij}(a)$ a taxa de transição do estado $i \in S$ para o estado $j \in S$ ao se tomar a ação $a \in A(i)$.

2.1 Probabilidade de Bloqueio

Conhecendo-se as probabilidades limite $\pi(j)$ [Puterman, 1994], que podem ser interpretadas como a proporção do tempo que o sistema permanece no estado j , obtém-se a probabilidade de bloqueio P_b das chamadas das classes cH, com $c \in \{1, 2, 3\}$, da seguinte forma:

$$P_b(cH) = 1 - \frac{T(cH)}{\lambda_{cH}},$$

em que $T(cH)$ é a capacidade total de processamento e transmissão de dados (*throughput*) da classe cH, e λ_{cH} é a taxa de chegada de requisições de conexão desta classe.

O *throughput* é calculado levando-se em conta o número de comprimentos de onda utilizados pela classe em cada estado do sistema (n_{cH}), multiplicado pela taxa de processamento desta classe μ_{cH} , e pela proporção de tempo em que o sistema fica em cada estado, ou seja, a probabilidade limite do mesmo. Assim, tem-se que:

$$T(cH) = \sum_{i \in S} n_{cH} \mu_{cH} \pi(i)$$

Os cálculos são feitos de forma análoga para as chamadas das classes cA, com $c \in \{1, 2, 3\}$.

3. Resultados Numéricos

O modelo de nó aqui proposto foi implementado utilizando-se a biblioteca Modelagem Estocástica – ModEsto, desenvolvida na linguagem C++ pelo Laboratório Associado de Matemática e Computação Aplicada - LAC, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. A política ótima para o mesmo foi obtida por meio do algoritmo de iteração de valores (ver, por exemplo, Puterman, 1994).

Notou-se, no caso específico de resolução do modelo com parâmetros simétricos, a presença de múltiplas políticas ótimas. Por parâmetros simétricos entende-se que as taxas de chegada tanto no sentido horário como no anti-horário são as mesmas ($\lambda_{cH} = \lambda_{cA}$ com $c \in \{1, 2\}$), assim como as taxas de processamento das chamadas ($\mu_{cH} = \mu_{cA}$ com $c \in \{1, 2, 3\}$) e o número de comprimentos de onda ($WH = WA$).

Adotando-se tais parâmetros, no momento em que uma requisição de chamada da classe 3 chega ao sistema e é aceita, se o sistema encontra-se em um estado também simétrico, o roteamento da chamada para qualquer um dos dois sentidos resulta em um retorno de mesmo valor, fazendo com que as duas ações possíveis (ACCH e ACCA) possam ser associadas a esse estado. Um estado simétrico é aquele em que o número de comprimentos de onda ocupados por cada classe de chamadas no sentido horário é o mesmo no sentido anti-horário, como por exemplo, o estado $i = (0, 0, 2, 2, 1, 1, a_3)$.

Dessa forma, como em cada um dos estados simétricos existentes pode-se tomar a ação ACCH ou ACCA, múltiplas políticas ótimas são encontradas. Para a escolha de uma dessas políticas, neste trabalho, decidiu-se rotear as chamadas para o sentido horário, associando-se a ação ACCH a todos os estados simétricos.

Para testar o modelo proposto foram utilizados dados hipotéticos. Admitiram-se 8 comprimentos de onda (canais), tanto no sentido horário como no sentido anti-horário: $WH = WA = 8$. Consideraram-se taxas de processamento das chamadas iguais para todas as classes, $\mu_{cH} = \mu_{cA} = 1$ com $c \in \{1, 2, 3\}$, assim como as taxas de chegada, $\lambda_{cH} = \lambda_{cA} = \lambda_3$, com $c \in \{1, 2\}$, mas variou-se o valor destas últimas até que a capacidade de atendimento do sistema ficasse saturado.

Sob essas condições, duas funções objetivo foram testadas. A primeira, apresentada na Tabela 3, tem como finalidade maximizar o *throughput* do nó, em que as classes têm o mesmo peso, $r_1 = r_2 = r_3 = 1$. A segunda (Tabela 4) visa maximizar o número de comprimentos de onda utilizados pelo nó, fazendo com que as chamadas da classe 2 tenham peso dois ($r_2 = 2$), visto que estas utilizam dois comprimentos de onda, um na entrada do nó e um na saída, e as demais tenham peso 1 ($r_1 = r_3 = 1$). Nota-se que o valor dos pesos, relacionados a cada função objetivo, influencia diretamente o cálculo do retorno esperado para cada ação tomada.

Na Tabela 3 apresentam-se, para alguns valores de taxas de chegada, as probabilidades de bloqueio para cada classe do sistema. Observa-se que, à medida que as taxas de chegada crescem, a probabilidade de bloqueio das classes 2H e 2A aumentam em relação as demais, visto que a função objetivo visa maximizar o número de chamadas atendidas pelo nó, e as chamadas dessa classe utilizam mais recursos.

Tabela 3 – Probabilidades de bloqueio sob a função objetivo 1

| Taxa \ Classe | 2 | 4 | 8 | 12 | 16 |
|---------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| 1H | 0.030212 | 0.225624 | 0.473878 | 0.592653 | 0.665192 |
| 1A | 0.0302188 | 0.225855 | 0.475455 | 0.594099 | 0.666767 |
| 2H | 0.031357 | 0.255281 | 0.63825 | 0.7916 | 0.863802 |
| 2A | 0.0313226 | 0.25482 | 0.636194 | 0.789913 | 0.862056 |
| 3H | 0.496208 | 0.504812 | 0.554473 | 0.622088 | 0.678155 |
| 3A | 0.503882 | 0.508322 | 0.56035 | 0.625311 | 0.681192 |

Já na Tabela 4 apresentam-se as probabilidades de bloqueio de cada classe ao se maximizar o número de comprimentos de onda utilizados. Percebe-se que, à medida que as chegadas deixam o sistema saturado, a probabilidade de bloqueio das chamadas da classe 2 (2H e 2A) aparecem ligeiramente menores em relação à Tabela 3, ou seja, dá-se uma preferência maior às chamadas dessa classe, que consomem dois comprimentos de onda, e, por consequência, a probabilidade de bloqueio cresce para as outras classes.

Nota-se também, em ambos os casos, que as chamadas que saem do nó, classes 3H e 3A, apresentam maior probabilidade de bloqueio em relação as que chegam ao nó

(1H e 1A), mesmo ambas utilizando a mesma quantidade de recurso. Isso acontece pelo fato das chamadas que saem do nó poderem ser bloqueadas mesmo quando há comprimentos de onda suficientes para atendê-las, favorecendo as demais.

Tabela 4 - Probabilidades de bloqueio sob a função objetivo 2

| Taxa \ Classe | 2 | 4 | 8 | 12 | 16 |
|---------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| 1H | 0.0302126 | 0.225686 | 0.494306 | 0.618118 | 0.685279 |
| 1A | 0.0302193 | 0.225904 | 0.495406 | 0.619484 | 0.686597 |
| 2H | 0.031356 | 0.255216 | 0.610154 | 0.760365 | 0.840722 |
| 2A | 0.0313226 | 0.254772 | 0.608748 | 0.758797 | 0.839272 |
| 3H | 0.496341 | 0.504961 | 0.571814 | 0.649018 | 0.699585 |
| 3A | 0.50375 | 0.508189 | 0.575568 | 0.652198 | 0.702117 |

4. Conclusões

Neste trabalho, utilizou-se um processo markoviano de decisão para modelar o roteamento adaptativo em um nó bidirecional de uma rede WDM totalmente óptica. O objetivo foi encontrar as políticas ótimas para dois casos: maximização do *throughput* (chamadas atendidas) do nó, e maximização de recursos (comprimentos de onda) utilizados.

Os resultados preliminares comprovaram que dependendo da função objetivo escolhida pode-se priorizar uma classe de chamadas em detrimento das demais, o que permite o cálculo das políticas ótimas referentes a diversas configurações de rede.

Para trabalhos futuros, pretende-se utilizar o modelo de nó aqui apresentado para o estudo de um anel óptico bidirecional com vários nós, estudando a convergência do modelo através das políticas ótimas encontradas para cada nó, com objetivo de otimizar o roteamento da rede. Pretende-se, ainda, utilizar outras funções objetivo, e analisar o comportamento do modelo em cada uma delas.

Agradecimentos: Os autores agradecem à CAPES pelo apoio financeiro.

Referências

- Maier, M., (2008). Optical Switching Networks. 1º ed. Cambridge University Press. ISBN 0521868009.
- Mosharaf, K., Talim, J., Lambadaris, I., (2003). A Markov Decision Process Model for Dynamic Wavelength Allocation in WDM Networks. *IEEE Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM '03.*, v. 5, p. 2590–2594.
- Pezoulas, L., Fransisco, M. J., Lambadaris, I., Huang, C., (2003). Performance Analysis of a Backward Reservation Protocol in Networks with Sparse Wavelength Conversion, in *Proc. ICC3*, vol. 2, pp. 1468–1473.

- Puterman, M. L., (1994). Markov Decision Processes. New York: Wiley.
- Ramaswami, R., Silvarajan, K. N., (1995). Routing and Wavelength Assignment in all-optical Networks. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, v. 3, n. 5, p. 489–500.
- Rosa, A. de N. F. da, Carvalho, S. V. de, Leal, C. F., Francês, C. R. L., Costa, J. C. W. A., (2009). Processo markoviano de decisão para a alocação dinâmica de recursos e controle justo em redes ópticas WDM. *XLI SBrT*,
- Sivalingam, K. M., Subramaniam, S., (2000). Optical WDM Networks - Principles and Practice. 1. ed. Springer. ISBN 0792378253.
- Tachibana, T., Kasahara, S., Sugimoto, K., (2007). Dynamic Lightpath Establishment for Service Differentiation Based on Optimal MDP Policy in All-Optical Networks with Wavelength Conversion. *IEEE International Conference on Communications - ICC '07*. p. 2424 – 2429.
- Zang, H., Jue, J. P., Mukherjee, B., (2000). A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks, *Opt. Netw. Mag.*, vol. 1, no. 1, p. 47–60.