

MODELO MARKOVIANO DE DECISÃO PARA A ALOCAÇÃO DINÂMICA DE RECURSOS E CONTROLE JUSTO EM REDES ÓPTICAS WDM

Adriana de Nazaré Farias da Rosa¹
Solon Venâncio de Carvalho²
Carlos Renato Lisboa Francês¹
Cynthia Feitosa Leal¹
João Crisóstomo Weyl A. Costa¹

¹Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, PA, Brasil

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil
{adriana, rfrances, cynthia, jweyl}@ufpa.br; solon@lac.inpe.br

RESUMO

Neste trabalho busca-se políticas de alocação dinâmica de comprimentos de onda em redes ópticas WDM. Estuda-se um anel óptico unidirecional com 4 nós e tráfego homogêneo entre os diferentes pares *origem – destino de nós*. Os intervalos entre chegadas e tempos de processamento das chamadas em cada nó são, por hipótese, independentes e exponencialmente distribuídos. Em linhas gerais, o objetivo do trabalho consiste na determinação de uma política ótima que maximiza o número médio de canais utilizados no anel. O problema é formulado como um processo markoviano de decisão (MDP) para cada nó. O algoritmo de iteração de valores é utilizado para obtenção da política de alocação ótima. Resultados numéricos são apresentados.

PALAVRAS CHAVE. Redes Ópticas WDM (*Wavelength Division Multiplexin*). Alocação Dinâmica de Comprimento de Onda. Processo Markoviano de Decisão.

Área de classificação principal - Estatística

ABSTRACT

This paper outlines policies for dynamic assignment of wavelengths in WDM optical networks. The study is based on a unidirectional optical ring with 4 nodes with homogeneous traffic between different pairs of origin – destination nodes. The intervals between arrival and processing time of calls in each node are, by definition, independent and exponentially distributed. In general, the purpose of work is the determination of an optimal policy that maximizes the average number of channels in use on the optical ring. The problem is formulated as a Markov Decision Process (MDP) for each node and an algorithm of iteration of values is used to obtain the optimal allocation policy. Numerical results are presented.

KEYWORDS. Optical WDM Networks. Dynamic Wavelength Allocation. Markov Decision Process.

Main area - Statistic.

1. Introdução

Redes WDM (*Wavelength Division Multiplexin*) consistem em um conjunto de equipamentos e meios físicos que têm capacidade de otimizar o uso de redes de fibras ópticas. Esta tecnologia tem se mostrado uma solução promissora para a crescente demanda de banda em redes de telecomunicações atuais. Em linhas gerais, tal tecnologia divide uma grande largura de banda de transmissão em fibra óptica em múltiplos canais de comunicação com bandas compatíveis com as velocidades de processamento eletrônico dos usuários finais (Ishida, 2007).

Existe um grande interesse em redes WDM que utilizam roteamento do comprimento de onda entre os nós interconectados por fibra óptica. Estas redes transportam dados entre as estações de acesso no domínio óptico, sem qualquer conversão eletrônica intermediária. Para que seja possível enviar os dados de um nó para outro, é necessário estabelecer uma conexão na camada óptica, semelhante a um circuito de rede comutada. Isso pode ser realizado através da determinação de um caminho entre dois nós e a atribuição de um comprimento de onda disponível em todos os *links* ao longo do caminho estabelecido. Tal percurso óptico é comumente referido como um *lightpath* e pode ser estendido em *links* de múltiplas fibras sem qualquer processamento eletrônico intermediário, enquanto utiliza um canal WDM por *link*. A largura de banda em todo o *lightpath* é reservada para uma conexão até que a mesma seja encerrada. Quando uma conexão é encerrada, o comprimento de onda associado torna-se disponível para todos os *links* ao longo do percurso (Ishida, 2007).

Os *lightpaths* correspondem ao elemento básico da arquitetura de redes WDM (Mukherjee, 1997) (Mukherjee, 2000) e o seu estabelecimento correto é crucial para garantir qualidade de serviço e o bom desempenho da rede. Sendo assim, é de suma importância prover rotas para os *lightpaths* requisitados e atribuir comprimentos de onda em cada um dos *links* ao longo do percurso entre o nó origem e o nó destino. Na ausência da conversão do comprimento de onda, é necessário que o *lightpath* ocupe o mesmo comprimento de onda em todos os *links* de fibra utilizados. Esta exigência é referida como *wavelength continuity constraint*. Tal problema pode ser relaxado pelo uso de conversores de comprimento de onda (WCs) em nós intermediários (Zang et al, 2000).

O problema de roteamento e atribuição de comprimento de onda (*Routing and Wavelength Assignment* - RWA) é uma importante questão em redes WDM (Mosharaf et al., 2004) e costuma ser dividido em dois sub – problemas: *i*) Problema de atribuição de comprimento de onda e *ii*) Problema de roteamento. Muitos algoritmos heurísticos têm sido propostos e diferem nas suposições sobre o padrão de tráfego, disponibilidade de comprimento de onda e objetivos desejáveis. Os tráfegos pressupostos geralmente caem em uma das duas categorias: estáticos ou dinâmicos. Nos modelos RWA estáticos admite-se que a demanda é fixa e conhecida, ou seja, todos os *lightpaths* que serão criados na rede são conhecidos antecipadamente. O objetivo é tipicamente atender a demanda e ao mesmo tempo minimizar o número de comprimentos de onda utilizados em todos os *links*. Diferente do modelo estático, no modelo dinâmico admite-se que as requisições de *lightpath* entre os pares *origem-destino* chegam randomicamente, e possuem um tempo de encerramento aleatório. O objetivo principal, neste caso, consiste em minimizar a probabilidade de bloqueio, ou minimizar o total (de forma ponderada) do número de chamadas bloqueadas durante um dado período de tempo. Alguns algoritmos heurísticos, tais como *Random*, *Least-Used*, *Most-Used*, e o *First-Fit Wavelength assignments*, têm sido propostos para atribuir o comprimento de onda em redes WDM com tráfego dinâmico (Zang et al., 2000; Pezoulas et al, 2003).

O problema RWA é de extrema importância para o aumento da eficiência de redes ópticas baseadas no roteamento do comprimento de onda. O comprimento de onda designado deve ser tal que não haja possibilidade de dois *lightpaths*, que partilham uma mesma ligação física, utilizarem o mesmo comprimento de onda sobre esse *link*. Vale ressaltar que, em redes sem conversores, o mesmo comprimento de onda deve ser utilizado em todos os *links* do *lightpath* (*wavelength continuity constraint*). Com uma boa solução deste problema, mais clientes podem ser atendidos pelo sistema, e menos clientes necessitam ser rejeitados durante períodos de congestionamento.

Neste trabalho, estuda-se o problema da alocação de comprimento de onda em um anel óptico unidirecional com 4 nós. Modela-se cada nó da rede como um Processo Markoviano de Decisão a tempo contínuo (CTMDP) (Puterman, 1994) com 3 classes diferentes de chamadas: as que chegam ao nó, as que passam pelo nó e as que saem do nó. O objetivo é obter uma política ótima para a atribuição de comprimento de onda no nó de maneira a maximizar o número médio de canais utilizados por cada classe. Este modelo foi desenvolvido para redes WDM que não utilizam conversores de comprimento de onda.

O trabalho está organizado da seguinte forma: Na seção 2 apresenta-se uma breve definição do problema. Na seção 3, por sua vez, a formulação do modelo de cada nó como um processo markoviano de decisão (MDP) para uma topologia de rede de um anel óptico com 4 enlaces(nós). Na seção 4, são apresentados resultados numéricos. As considerações finais e perspectivas de trabalhos futuros são apresentadas na seção 5.

2. Alocação Dinâmica de Comprimento de Onda

Política de alocação do comprimento de onda é um problema particular relacionado à política de alocação de recursos. Em geral, estratégias para a alocação do comprimento de onda estão incorporadas em algoritmos heurísticos tais como *complete sharing* (CS) e *complete partitioning* (CP) (Ross & Tsang 1989). Na política CS nenhum comprimento de onda é reservado e uma chamada só será aceita se no mínimo um comprimento de onda estiver disponível em todo o caminho a ser utilizado pela chamada. Esta abordagem apresenta uma alta utilização da rede global mas não maximiza o *throughput* da rede. A política CP, por sua vez, atribui para cada classe de chamada um número constante de comprimento de onda, que não pode ser utilizado por chamadas de outras classes. Desta forma, ela suporta serviços diferenciados e controle de probabilidade de bloqueio das classes base. Entretanto, a política CP não maximiza a utilização de todos os recursos disponíveis (Mosharaf et al . 2004).

Para melhorar o desempenho do sistema em um ambiente dinâmico, seria essencial atribuir certo número de comprimentos de onda para cada classe em função do número de clientes nas diferentes classes (Mosharaf et al, 2005). Neste contexto, investiga-se uma política de alocação dinâmica do comprimento de onda, que consiste na determinação da aceitação ou não das chamadas que chegam a um nó do anel, tendo em conta o estado atual do sistema, com o objetivo de maximizar o número médio de canais utilizados pelas chamadas.

Considera-se um anel óptico unidirecional com 4 nós como mostrado na figura 1. Cada enlace possui o mesmo número de comprimentos de onda W . O tráfego é gerado (ou oferecido à rede) na forma de chamadas. Uma chamada é essencialmente uma requisição feita por um dado nó para que seja reservado um conjunto fixo de recursos para uso exclusivo do fluxo de informações associado à chamada.

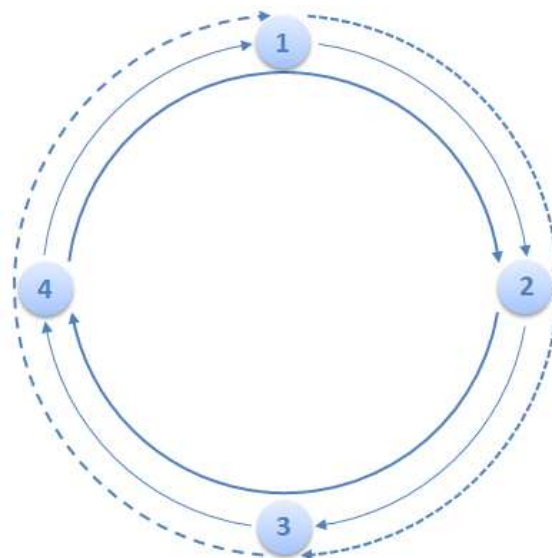


Figura 1 – Anel óptico unidirecional.

O tráfego na rede é homogêneo, ou seja, cada nó possui a mesma probabilidade de gerar tráfego. Além disso, cada chamada originada na rede destina - se apenas a um único nó destino, não sendo permitido, portanto, o *multicasting* de chamadas.

As chamadas entre dois nós diferentes quaisquer chegam ao anel de acordo com processos de Poisson independentes, cada um com taxa λ . Os tempos de duração das chamadas são independentes e exponencialmente distribuído com taxa μ . Uma chamada que chega à rede será alocada e o seu serviço começará imediatamente se os recursos necessários estiverem disponíveis e se todos os nós envolvidos em sua transmissão aceitá-la. Caso contrário, considera-se que a chamada é perdida. Não há mecanismos de espera nesta rede.

Cada nó é modelado por um Processo Markoviano de Decisão. No modelo de cada nó considera-se que cada chamada que chega ao nó é classificada em uma de três classes de serviço que correspondem a diferentes pares *origem – destino*. A classe 1 corresponde às chamadas que se destinam ao nó; a classe 2 corresponde às chamadas que passam pelo nó, sem que este seja sua origem ou destino; a classe 3, por sua vez, consiste nas chamadas que partem do nó em questão. Nos instantes de chegada de uma nova chamada, em função da quantidade de chamadas já em transmissão pelo nó e da classe da chamada que chegou, deve-se decidir sobre sua aceitação de forma a otimizar o uso dos recursos disponíveis no nó.

Na Figura 2 temos $\lambda_i, i \in \{1, 2, 3\}$ que corresponde à taxa de chegada de chamadas da classe $i, i \in \{1, 2, 3\}$, em um dado nó do anel, enquanto que $\lambda'_i, i \in \{1, 2, 3\}$ consiste na taxa de chegadas que efetivamente entram no nó de observação, isto é, que não são bloqueadas no nó. Uma chamada será transmitida se não for bloqueada por nenhum dos nós que deve passar.

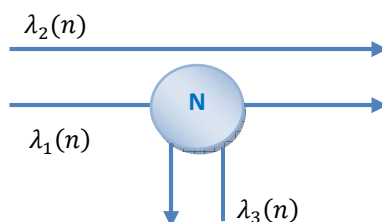


Figura 2 – Modelo de um nó do anel.

Supondo conhecidas as probabilidades de bloqueio de chamadas de cada classe em cada nó, e supondo, por aproximação, que o comportamento dos nós são independentes, é possível calcular a probabilidade de bloqueio de cada chamada no anel em função dos seus nós de origem e destino. Por exemplo, uma chamada originando no nó 2 e destinada ao nó 4, será transmitida se não for bloqueada no nó 2 (neste nó a chamada é da classe 3), nem no nó 3 (classe 2) e nem no nó 4 (classe 1), assim sua probabilidade de bloqueio no anel será:

$$1 - [1 - B_3(2)] [1 - B_2(3)] [1 - B_1(4)]$$

O modelo proposto para os nós será detalhado na seção seguinte. Sua resolução para cada nó i ($i=1, 2, 3$ e 4) fornece a política de controle de aceitação de novas chamadas pelo nó e a probabilidade de bloqueio pelo nó de uma chamada pertencente a cada uma das três classes consideradas. Estas probabilidades são $B_1(i)$, $B_2(i)$ e $B_3(i)$ para as classes 1, 2 e 3 respectivamente.

O modelo proposto para o anel agrega e compatibiliza iterativamente os resultados obtidos pelos modelos individuais dos nós. Para cada nó, define-se uma função $v(n, s)$ que, a partir de um nó de referência n ($1 \leq n \leq 4$) e de uma variação de posição s ($-3 \leq s \leq 3$), retorna o índice do nó no anel em tal posição. Esta função é dada por:

$$v(n, s) = \begin{cases} n + s & \text{se } 1 \leq n + s \leq n \\ n + s - 4 & \text{se } n + s > 4 \\ n + s + 4 & \text{se } n + s < 4 \end{cases}$$

E será usada no Algoritmo 1 mostrado a seguir que corresponde à resolução do modelo proposto para o anel.

Algoritmo 1

Inicializar $B_1(i) \leftarrow 0$, $B_2(i) \leftarrow 0$ e $B_3(i) \leftarrow 0$ para $i = 1, 2, 3$ e 4

Repetir

ErroIteração $\leftarrow 0$

 Para i de 1 até 4 fazer:

$$\lambda_1 \leftarrow \lambda \{ [1 - B_3(v(i, -3))] [1 - B_2(v(i, -2))] [1 - B_2(v(i, -1))] + [1 - B_3(v(i, -2))] [1 - B_2(v(i, -1))] + [1 - B_3(v(i, -1))] \}$$

$$\lambda_2 \leftarrow \lambda \{ [1 - B_3(v(i, -2))] [1 - B_2(v(i, -1))] [1 - B_1(v(i, +1))] + [1 - B_3(v(i, -1))] [1 - B_1(v(i, +1))] + [1 - B_3(v(i, -1))] [1 - B_2(v(i, +1))] [1 - B_1(v(i, +2))] \}$$

$$\lambda_3 \leftarrow \lambda \{ [1 - B_1(v(i, +1))] + [1 - B_2(v(i, +1))] [1 - B_1(v(i, +2))] + [1 - B_2(v(i, +1))] [1 - B_2(v(i, -2))] [1 - B_1(v(i, -1))] \}$$

 Utilizar os valores calculados para λ_1 , λ_2 e λ_3 para resolver o modelo do nó. A partir do modelo do nó obter a política de aceitação de chamadas para o nó, e as probabilidades de bloqueio do nó sob a política ótima: M_1 , M_2 e M_3 para as classes 1, 2 e 3 respectivamente.

 Para o nó corrente, calcular o erro absoluto entre as probabilidades de bloqueio correntes e as fornecidas pelo modelo:

$$\text{Erro}(i) \leftarrow \max\{ |B_1(i) - C_1|, |B_2(i) - C_2|, |B_3(i) - C_3| \}$$

 Se *ErroIteração* $<$ *Erro*(i) Fazer *ErroIteração* \leftarrow *Erro*(i) FimSe

 FimPara

Enquanto *ErroIteração* $>$ *Erro Pré-fixado*

Para os anéis homogêneos, os resultados obtidos para cada nó são idênticos. Assim é possível utilizar os resultados obtidos para um nó em todos os nós do anel e, então, as probabilidades de bloqueio obtidas independem do nó em questão e podem ser representadas simplesmente por B_1 , B_2 e B_3 . Desta forma o Algoritmo 1 pode ser simplificado:

Algoritmo 2

Inicializar $B_1 \leftarrow 0$, $B_2 \leftarrow 0$ e $B_3 \leftarrow 0$

Repetir

$$\lambda_1 \leftarrow \lambda [1 - B_3] \{ [1 - B_2]^2 + [1 - B_2] + 1 \}$$

$$\lambda_2 \leftarrow \lambda [1 - B_3] \{ 2[1 - B_2] + 1 \} [1 - B_1]$$

$$\lambda_3 \leftarrow \lambda \{ 1 + [1 - B_2] + [1 - B_2]^2 \} [1 - B_1]$$

 Utilizar os valores calculados para λ_1 , λ_2 e λ_3 para resolver o modelo do nó. A partir do modelo do nó obter a política de aceitação de chamadas para o nó, e as probabilidades de bloqueio do nó sob a política ótima: M_1 , M_2 e M_3 para as classes 1, 2 e 3 respectivamente.

 Calcular o erro absoluto entre as probabilidades de bloqueio correntes e as fornecidas pelo modelo:

$$\text{Erro} \leftarrow \max\{ |B_1 - C_1|, |B_2 - C_2|, |B_3 - C_3| \}$$

Enquanto *Erro* $>$ *Erro Pré-fixado*

Os resultados numéricos apresentados na seção 4 foram obtidos com o Algoritmo 2, que para todos os conjuntos de dados testados coincidiram com os obtidos pelo Algoritmo 1.

3. O Modelo Markoviano de Decisão de cada nó

Nesta seção, descreve-se a modelagem markoviana proposta para o problema descrito na seção anterior. Cada estado do sistema é definido pelo conjunto de valores (n_1, n_2, n_3, ev) , onde ev corresponde ao último evento ocorrido no sistema, podendo assumir os valores a_i ou s_i , se a última ocorrência de evento for a chegada ou o término de processamento de uma chamada da classe $i \in \{1, 2, 3\}$ respectivamente. Ainda em relação a cada estado, $n_i, i \in \{1, 2, 3\}$, corresponde ao número de comprimentos de ondas utilizados pela classe i , imediatamente antes da ocorrência do evento ev . Desta forma, o espaço de estados S do modelo proposto considerando um anel óptico unidirecional homogêneo, onde todos os nós têm a mesma probabilidade de geração de tráfego, é:

$$S = \{ (n_1, n_2, n_3, ev) \mid n_1 \geq 0, n_2 \geq 0, n_3 \geq 0, e \in \{a_1, a_2, a_3, s_1, s_2, s_3\}, \\ n_1 + n_2 \leq W, n_2 + n_3 \leq W, \\ \text{se } n_1 = 0 \text{ então } ev \neq s_1, \\ \text{se } n_2 = 0 \text{ então } ev \neq s_2, \\ \text{se } n_3 = 0 \text{ então } ev \neq s_3 \}$$

Por hipótese, o sistema é observado continuamente no tempo. A cada chegada de uma nova chamada, deve-se decidir sobre sua aceitação ou rejeição (A ou R). Uma nova chamada só poderá ser aceita quando houver comprimentos de onda para alocá-la. A cada término de processamento de chamada, esta sai do sistema e nenhuma decisão é tomada, ou seja, deve-se adotar a ação N (nenhuma ação). Assim para cada estado $s = (n_1, n_2, n_3, e) \in S$, as ações possíveis $A(s)$, em cada nó do anel, são:

$$A(s) = \left\{ \begin{array}{l} \{ACC, REJ\} \quad \text{se} \quad \left\{ \begin{array}{l} (e = a_1 \wedge n_1 + n_2 \leq W) \vee \\ (e = a_2 \wedge n_1 + n_2 \leq W \wedge n_2 + n_3 \leq W) \vee \\ (e = a_3 \wedge n_2 + n_3 \leq W) \end{array} \right. \\ \\ \{REJ\} \quad \text{se} \quad \left\{ \begin{array}{l} (e = a_1 \wedge n_1 + n_2 = W) \vee \\ (e = a_2 \wedge (n_1 + n_2 = W \vee n_2 + n_3 = W)) \vee \\ (e = a_3 \wedge n_2 + n_3 = W) \end{array} \right. \\ \\ \{NOA\} \quad \text{se} \quad e = s_1 \vee e = s_2 \vee e = s_3 \end{array} \right.$$

O comportamento dinâmico do sistema é definido pela observação contínua do estado corrente do sistema $s = (n_1, n_2, n_3, e) \in S$, e pela ação adotada $a \in A(s)$ cada vez que este estado se altera, ou seja, quando ocorre um novo evento. Admite-se que a decisão é tomada imediatamente após a observação da ocorrência do evento.

Se o estado $s = (n_1, n_2, n_3, e) \in S$ é observado e uma ação $a \in A(s)$ é escolhida, o sistema deve passar imediatamente a um “estado” reagido s_r apresentado na Tabela 1, e aguardar a ocorrência do próximo evento, quando ocorrerá a próxima transição. Se o último evento em $s \in S$ é a chegada de uma chamada e é tomada a decisão de aceitá-la, o sistema imediatamente muda para um “estado” reagido s_r em que a nova chamada é incorporada ao sistema. Se o último

evento é o término de uma chamada, a única ação possível é não fazer nada e a chamada deve ser imediatamente retirada do sistema. As condições do estado $s \in S$, a ação tomada $a \in A(s)$ e o estado reagido s_r , são apresentados na Tabela 2.

Na Tabela 3, por sua vez, apresentam - se o próximo estado e a taxa de cada transição, em função do estado reagido a que chega o sistema e do próximo evento a ocorrer. Note que as transições possíveis são combinações das linhas das Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Estado Reagido.

Condição	Ação	Estado Reagido $s_r=(r_1, r_2, r_3)$
$ev = a_1 \wedge n_1+n_2 < W$	A	(n_1+1, n_2, n_3)
$ev = a_2 \wedge n_1+n_2 < W \wedge n_2+n_3 < W$	A	(n_1, n_2+1, n_3)
$ev = a_3 \wedge n_2+n_3 < W$	A	(n_1, n_2, n_3+1)
$ev = s_1 \quad (n_1 > 0)$	N	(n_1-1, n_2, n_3)
$ev = s_2 \quad (n_2 > 0)$	N	(n_1, n_2-1, n_3)
$ev = s_3 \quad (n_3 > 0)$	N	(n_1, n_2, n_3-1)
<i>caso contrário</i>	R	(n_1, n_2, n_3)

Tabela 3 – Próximo estado e taxa de transição associada.

Próximo Evento	Próximo Estado	Taxa de Transição
a_1	(r_1, r_2, r_3, a_1)	λ_1
a_2	(r_1, r_2, r_3, a_2)	λ_2
a_3	(r_1, r_2, r_3, a_3)	λ_3
s_1	(r_1, r_2, r_3, s_1)	$r_1 \mu_1$
s_2	(r_1, r_2, r_3, s_2)	$r_2 \mu_2$
s_3	(r_1, r_2, r_3, s_3)	$r_3 \mu_3$

Para finalizar a modelagem do Processo Markoviano de Decisão (MPD), é necessário definir uma função de retorno $R(s, a)$, que corresponde ao retorno total esperado do sistema até o próximo instante de observação, dado que sistema é observado no estado $s = (n_1, n_2, n_3, e) \in S$, e a ação tomada $a \in A(s)$ é escolhida.

No modelo, o retorno corresponde ao número de chamadas sendo transmitidas no estado corrente, eventualmente ponderados por pesos r_1, r_2 e r_3 atribuídos à ocupação de canais por cada uma das classes $i, i \in \{1, 2, 3\}$. Como imediatamente após a escolha da ação, o sistema passa ao “estado” reagido $s_r=(t_1, t_2, t_3, e_r)$ mostrado na Tabela 2, é em função do estado reagido que se deve obter o retorno $R(s, a)$ da seguinte maneira:

$$R(s, a) = (r_1 t_1 + r_2 t_2 + r_3 t_3) \tau(s, a)$$

Onde $\tau(s, a)$ corresponde ao tempo esperado até o próximo instante de decisão, que é dado por $\tau(s, a) = \sum_{s' \neq s} A_{ss'}(a)$. $A_{ss'}(a)$ consiste na taxa de transição do estado $s \in S$ para o estado $s' \in S$, quando a ação $a \in A(s)$ é escolhida.

A função de retorno proposta para ser maximizada é bastante geral, por exemplo:

- Se $r_1=1, r_2=2$ e $r_3=1$, a função de retorno corresponde à utilização de recursos pelo nó.

- Se $r_1=\mu$, $r_2=\mu$ e $r_3=\mu$, a função de retorno corresponde ao *throughput* do nó.

Para este trabalho, considerou-se a maximização da utilização de recursos por cada nó. São também apresentados resultados para outros valores dos pesos r_1 , r_2 e r_3 com a finalidade de estudar a justiça (*fairness*) do anel.

4. Resultados Numéricos

O seguinte conjunto de dados foi considerado para testar o modelo proposto;

- Quantidade de canais (comprimentos de onda) disponíveis: 16;
- Taxa de chegada de chamadas, $\lambda =: 2, 4, 6, 8, 10$ ou 20 ;
- Taxa de processamento das chamadas, $\mu = 1$;
- Pesos atribuídos às classes, $r_1 = r_2 = r_3 = 1$;

Considerou - se um anel óptico unidirecional com 4 enlaces, onde cada enlace da rede possui 16 canais disponíveis. No modelo proposto, admitiu - se que todos os nós têm a mesma probabilidade de gerar tráfego. Admitiu - se ainda que todas as classes tenham as mesmas taxas de chegada de chamada, as mesmas taxas de processamento de chamadas e os mesmos pesos.

Na tabela 4 observa - se a política ótima, o retorno e as probabilidades de bloqueio de cada classe de acordo com diferentes taxas de chegada.

Tabela 4 – Retorno e Probabilidade de bloqueio sob a política.

Taxa de Chegada	Política Ótima N^*_2	Retorno	Classe	Probabilidade de Bloqueio
2	16	5.99997	1	3,49956e-06
			2	7,39732e-06
			3	3,49956e-06
4	16	11.9325	1	0,00427295
			2	0,00832241
			3	0,00427295
6	15	16.8044	1	0,0481633
			2	0,102936
			3	0,0481633
8	15	19.823	1	0,098548
			2	0,325025
			3	0,098548
10	14	21.9067	1	0,122744
			2	0,563847
			3	0,122744
20	9	28.3189	1	0,292152
			2	0,999753
			3	0,292152

Para os dados considerados, a política ótima obtida determina nunca rejeitar chamadas do tipo 1 ou 3 e rejeitar as chamadas do tipo 2 quando o número destas chamadas já sendo transmitidas for maior ou igual à N^*_2 .

Pode-se observar na Tabela 4 que quanto maior a carga do sistema (taxa de chegada de chamadas) maior será a probabilidade de bloqueio em cada classe, sendo que o bloqueio de chamadas na classe 2 aumenta muito mais do que o bloqueio de chamadas nas outras classes. Por exemplo, quando a taxa de chegada em cada classe é 20, quase 100% das chamadas da classe 2 são bloqueadas. Este resultado indica que a política está dando prioridade para as classes que entram e saem do nó, praticamente não permitindo a chegada de chamadas que simplesmente passam pelo nó, ou seja, chamadas que devem ser retransmitidas para os nós seguintes.

Considerando o modelo da rede homogênea com 4 nós tem - se a análise como se segue. Na tabela 5 observa - se a probabilidade de bloqueio para as chamadas de acordo com o número de enlaces que foi percorrido até o nó de destino. Observa - se que as chamadas percorrem um maior número de enlaces possuem maior probabilidade de bloqueio, haja vista que utilizarão por maior tempo os recursos da rede.

Tabela 5 – Probabilidade de Bloqueio sob o número de enlaces.

Enlaces Percorridos	Probabilidade de Bloqueio
2	0.651513
3	0.916079
4	0.979791

Particularizando um nó da rede tem - se que, as chamadas chegam à rede com taxa 18 e saem do nó com taxa de 2.7157. A taxa das chamadas que passam pelo nó de observação é de 4.75067 e é a mesma das chamadas que passam e não são bloqueadas no respectivo nó.

Com base nesta análise, nas tabelas 6, 7 e 8 observamos respectivamente, dado o primeiro nó da rede, a taxa de chegada das chamadas, bem como a taxa de saída e a probabilidade de bloqueio de acordo com a *origem – destino* das chamadas.

Tabela 6 – Taxa de chegada em um nó do anel.

Nó de Origem	1	2	3	4
1	0	6	6	6
2	0.122946	0	0	0
3	0.510542	0.510542	0	0
4	2.12006	2.12006	2.12006	0

Tabela 7 – Taxa de saída em um nó do anel.

Nó de Origem	1	2	3	4
1	0	2.12006	2.12006	2.12006
2	0.122946	0	0	0
3	0.510542	0.122946	0	0
4	2.09092	0.510542	0.510542	0

Tabela 8 – Probabilidade de Bloqueio em um nó do anel.

Nó de Origem	1	2	3	4
1	-----	0.646656	0.646656	0.646656
2	0.0137455	-----	-----	-----
3	0.0137455	0.759186	-----	-----
4	0.0137455	0.759186	0.759186	-----

Com base na análise acima tem - se que, as chamadas chegam ao próximo nó da rede com taxa de 2.75355. Já a taxa das chamadas que passam pelo próximo nó de é de 4.75067. As chamadas saem do próximo nó com taxa 18. Sendo assim, verifica - se o balanceamento do modelo proposto.

Pode -se ainda, analisar o índice de “justiça” da política ótima proposta através da resolução da seguinte equação (Jain et al, 1984).

$$f(\mathbf{x}) = \frac{\left[\sum_{i=1}^n x_i \right]^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad x_i = 0$$

$$x_i = \frac{\lambda_{ij}^o}{\lambda_{ij}^i}$$

Com base na mesma tem-se que índice de “justiça” para a rede anel unidirecional é de 0.529794. Já o *throughput* para o anel unidirecional com 4 enlaces é de 10.8628.

Por fim, tem - se a análise do *throughput* versus o índice de “justiça”.

Tabela 9 – *Throughput* x índice de “justiça”.

r_1	r_2	r_3	<i>Throughput</i>	Índice de “Justiça”	Probabilidade de Bloqueio por tipo de Chamada
10	1	10	17,108	0,3333	2: 0,14; 3: 1,00; 4: 1,00
5	1	5	17,119	0,3338	2: 0,14; 3: 1,00; 4: 1,00
2	1	2			
1	1	1	24,038	0,8243	2: 0,35; 3: 0,61; 4: 0,80
1	2	1	23,981	0,9654	2: 0,50; 3: 0,61; 4: 0,69
1	5	1			
1	10	1	18,994	1,00	2: 0,67; 3: 0,68; 4: 0,69

5. Considerações Finais

O trabalho propôs um modelo markoviano para um anel óptico unidirecional com tráfego homogêneo, onde todos os nós da rede possuem a mesma probabilidade de geração de tráfego. Cada nó é modelado por um Processo Markoviano de Decisão. Obtiveram-se, políticas ótimas de alocação de comprimento de onda a fim de maximizar o número médio de canais utilizados por cada classe de serviço em cada nó. Observou-se, que mesmo admitindo classes de tráfego

com o mesmo peso, para os dados numéricos considerados neste trabalho, a política ótima priorizou as chamadas que entram e saiam do nó, em detrimento das que passam pelo nó.

Para trabalhos futuros, pretende-se utilizar outras funções objetivos, incorporando o conceito de políticas de controle “justas” já no processo de otimização. Pretende-se também utilizar este tipo de modelagem para a análise de redes com tráfego heterogêneo, onde cada nó possui seu próprio tráfego, que é função da posição e dos serviços prestados pelo nó na rede.

Referências Bibliográficas

Ishida, S., A Study on Flexible, Reliable, and Scalable Wavelength-Routed Optical Networks. PhD Thesis. Department of Information Networking, Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University. February 2007.

Jain, R., Chiu, D., Hawe, W. A Quantitative Measure Of Fairness And Discrimination For Resource Allocation In Shared Computer Systems, Technical Report DEC-TR-301, 1984.

Mosharaf, K. Talim, J. Lambadaris, I., A Markov Decision Process Model for Dynamic Wavelength Allocation in WDM networks, IEEE GLOBECOM, San Francisco, CA, Dec. 2003, pp. 2590–2594.

Mosharaf, K. Talim, J. Lambadaris, I., Multithreshold Wavelength Allocation Policy for Fairness Control in WDM Ring Networks, Carleton Univ., Ottawa, ON, Canada, Tech. Rep., SCE-04–13, 2004.

Mosharaf, K. Talim, J. Lambadaris, I., Optimal Resource Allocation and Fairness Control in All-Optical WDM Networks, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 23, no. 8, august 2005.

Pezoulas, L. Fransisco, M. J. Lambadaris, I. Huang, C. Performance Analysis of a Backward Reservation Protocol in Networks with Sparse Wavelength Conversion, in *Proc. ICC3*, vol. 2, May 2003, pp. 1468–1473.

Puterman, M. L., *Markov Decision Processes*. New York:Wiley, 1994.

Mukherjee, B., *Optical Communication Networks*. McGraw - Hill, New York, 1997.

Mukherjee, B., WDMoptical communication networks: progress and challenges, IEEE J. Sel. Areas Commun. 18 (10) (2000).

Ross, K. W. Tsang, D. H. K. The Stochastic Knapsack Problem, IEEE Trans. Commun., vol. 37, no. 7, pp. 740–747, Jul. 1989.

Zang, H. Jue, J. P. Mukherjee, B., A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks, Optical Networks Magazine, vol. 1, no. 1, Jan. 2000, pp. 47-60.