

# PROCESSO MARKOVIANO DE DECISÃO APLICADO À ALOCAÇÃO DINÂMICA DE COMPRIMENTO DE ONDA EM UM NÓ DE REDES ÓPTICAS WDM

Solon Venâncio de Carvalho<sup>2</sup>  
Adriana de Nazaré Farias da Rosa<sup>1</sup>  
Carlos Renato Lisboa Francês<sup>1</sup>  
Cynthia Feitosa Leal<sup>1</sup>  
João Crisóstomo Weyl A. Costa<sup>1</sup>  
Rita de Cássia Meneses Rodrigues<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, PA, Brasil

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil  
{adrianan, rfrances, cynthias, jweyl}@ufpa.br; {solon, rita}@lac.inpe.br

## RESUMO

Neste trabalho investiga-se o problema da alocação ótima de comprimento de onda em um nó de redes ópticas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). Este problema é analisado considerando-se três classes de tráfego; cada classe corresponde a um par *origem-destino*. Atribui-se um peso a cada classe, de acordo com a importância da classe para a rede. Consideram-se, em cada classe, intervalos entre chegadas e tempos de processamento das chamadas exponencialmente distribuídos. O objetivo é determinar uma política de alocação de comprimento de onda, a fim de maximizar o número médio de canais utilizados por cada classe. O problema é formulado como um processo markoviano de decisão (PMD) e um algoritmo de iteração de valores é utilizado para obtenção da política de alocação ótima. Resultados numéricos são apresentados.

**PALAVRAS CHAVE.** Alocação Dinâmica de Comprimento de Onda, Processo Markoviano de Decisão, *Wavelength Division Multiplexin*.

**Area Principal - Estatística**

## ABSTRACT

In this paper we investigate the problem of optimal wavelength allocation in one node of all-optical wavelength-division-multiplexing networks. This problem is analyzed considering three classes of traffic; each class corresponds to a *source-destination* pair. We attribute a weight to each class, according to the class priority for the network. For each class, we consider that call interarrival and processing times are exponentially distributed. The objective is to determine a wavelength allocation policy in order to maximize the average number of used channel by each class. The problem is formulated as a Markov decision process (MDP), and a value iteration algorithm is employed to obtain the optimal allocation policy. Numerical results are presented.

**KEYWORDS.** Dynamic Wavelength Allocation, Markov Decision Process, Wavelength-Division-Multiplexing.

**Main Area - Statistic**

## 1. Introdução

Redes WDM (*Wavelength Division Multiplexin*) é o conjunto de equipamentos e meios físicos que têm capacidade de otimizar o uso de redes de fibras ópticas. Em linhas gerais, esta tecnologia divide uma grande largura de banda de transmissão em fibra óptica (ex: ~50 *Terabits/segundo*) em múltiplos canais de comunicação com bandas compatíveis (ex: ~10 *Gigabits/segundo*) 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).

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 (Mosharaf & Lambadaris, 2005).

Os *lightpaths* correspondem ao elemento básico da arquitetura de redes WDM 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. Isto é conhecido como o problema de roteamento e atribuição de comprimento de onda (*Routing and Wavelength Assignment - RWA*), e consiste em uma importante questão em redes WDM (Mosharaf et al., 2004). O RWA costuma ser dividido em dois problemas distintos: problema de atribuição do comprimento de onda e o problema de roteamento. 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*). O problema RWA é de extrema importância para o aumento da eficiência de redes ópticas baseadas no roteamento do comprimento de onda. Com uma boa solução deste problema, mais clientes podem ser atendidos pelo sistema, e menos clientes necessitam ser rejeitados durante períodos de congestionamento.

Numerosos estudos têm sido realizados sobre o problema RWA. Vários esquemas 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).

Neste trabalho, estuda-se o problema da alocação de comprimento de onda em um nó de uma rede WDM com diferentes classes de usuários. Modela-se o nó da rede como um Processo Markoviano de Decisão (PMD) (Puterman, 1994). O objetivo é obter uma política ótima de 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.

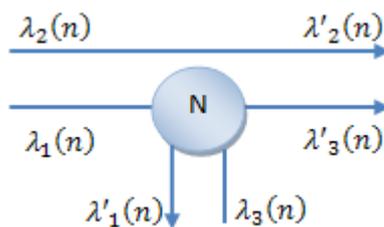
O trabalho é organizado da seguinte forma. Na seção 2, descreve-se, brevemente, o problema em estudo. Na seção 3, apresenta-se o modelo de decisão markoviano (MDP) proposto por este trabalho. Na seção 4 apresentam-se alguns resultados numéricos obtidos ao se testar o modelo proposto. As considerações finais e algumas perspectivas para pesquisas futuras são apresentadas na seção 5.

## 2. Descrição do Problema

Política de alocação do comprimento de onda é um problema particular relacionado à políticas 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). Em linhas gerais, na política CS nenhum comprimento de onda é reservado para qualquer classe e uma chamada só será aceita se no mínimo um comprimento de onda estiver disponível. Esta abordagem apresenta uma alta utilização da rede global e será sub-ótima se diferentes classes de usuários proverem “retornos” diferentes para o mesmo grau de serviço. Por sua vez, a política CP atribui a cada classe um número constante de comprimentos de onda, que não pode ser utilizado para chamadas de outras classes. Sendo assim, ela suporta serviços diferenciados e controle da 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 uma 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, no presente trabalho investiga-se uma política de alocação dinâmica de comprimentos de onda, que consiste na determinação da aceitação ou não das chamadas de cada classe que chegam ao nó, tendo em conta o estado atual do sistema, com o objetivo de maximizar o número médio de canais utilizados por cada classe.

Considera-se um nó de um anel óptico unidirecional, como mostrado na Figura 1. O tráfego no nó é dividido em três classes. Cada classe corresponde a diferentes pares *origem–destino*. A classe 1 corresponde às chamadas cujo destino é o próprio nó; a classe 2 corresponde às chamadas que passam pelo nó, porém se destinam a outro nó; a classe 3, por sua vez, consiste nas chamadas que partem do nó em questão.



**Figura 1 –Representação de um nó.**

As chamadas da classe  $i$ ,  $i \in \{1, 2, 3\}$ , chegam ao nó de acordo com um processo de Poisson com taxa  $\lambda_i$  e os seus tempos de processamento são exponencialmente distribuídos com taxa  $\mu_i$ . Qualquer nova chamada é bloqueada quando os comprimentos de onda estiverem ocupados. Na Figura 1,  $\lambda_i$ ,  $i \in \{1, 2, 3\}$ , são as taxas de chegada de chamadas da classe  $i$ ,  $i \in \{1,$

2, 3}, no nó, e  $\lambda_i, i \in \{1, 2, 3\}$ , são as taxas de chegadas que efetivamente entram no nó, ou seja, que não são bloqueadas quando chegam.

### 3. Formulação do Modelo Markoviano

Nesta seção, descreve-se a modelagem markoviano proposta para o problema descrito na seção anterior.

Cada estado do sistema é definido pelo conjunto de valores  $(n_1, n_2, n_3, ev)$ , em que  $ev$  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 para um nó óptico 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  $A(s)$  são:

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

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 1.

Na Tabela 2 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 1 e 2.

Tabela 1– Estado reagido

Condição	Ação	Estado reagido $s_r=(t_1, t_2, t_3, e_r)$
$ev=a_1 \wedge n_1+n_2 < W$	$A$	$(n_1+1, n_2, n_3, ev)$
$ev=a_2 \wedge n_1+n_2 < W \wedge n_2+n_3 < W$	$A$	$(n_1, n_2+1, n_3, ev)$
$ev=a_3 \wedge n_2+n_3 < W$	$A$	$(n_1, n_2, n_3+1, ev)$
$ev=s_1 \wedge (n_1 > 0)$	$N$	$(n_1-1, n_2, n_3, ev)$
$ev=s_2 \wedge (n_2 > 0)$	$N$	$(n_1, n_2-1, n_3, ev)$
$ev=s_3 \wedge (n_3 > 0)$	$N$	$(n_1, n_2, n_3-1, ev)$
caso contrário	$R$	$(n_1, n_2, n_3, ev)$

Tabela 2 – Próximo estado e taxa de transição

Próximo evento	Próximo estado	Taxa de transição
$a_1$	$(t_1, t_2, t_3, a_1)$	$\lambda_1$
$a_2$	$(t_1, t_2, t_3, a_2)$	$\lambda_2$
$a_3$	$(t_1, t_2, t_3, a_3)$	$\lambda_3$
$s_1$	$(t_1, t_2, t_3, s_1)$	$t_1 \mu_1$
$s_2$	$(t_1, t_2, t_3, s_2)$	$t_2 \mu_2$
$s_3$	$(t_1, t_2, t_3, s_3)$	$t_3 \mu_3$

Para completar a descrição 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 apresentado, este 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 1, é em função do estado reagido que se deve obter o retorno  $R(s, a)$  da seguinte maneira:

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

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

## 5. Resultados Numéricos

Para testar o modelo proposto, considerou-se o seguinte conjunto de dados;

- Quantidade de canais (comprimentos de ondas) disponíveis: 16;
- Taxa de chegadas de chamadas,  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$ : 2, 4, 6, 8, 10 ou 20;
- Taxa de processamento das chamadas:  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 1$ ;
- Pesos atribuídos às classes:  $r_1 = r_2 = r_3$ ;

Considerou-se um nó com 16 canais disponíveis. Neste nó, admitiu-se que todas as classes têm as mesmas taxas de chegada de chamadas, as mesmas taxas de processamento de chamadas, e os mesmos pesos. Variou-se a taxa de chegadas de chamadas nas classes.

Na Tabela 3, para as diferentes taxas de chegadas, apresentam-se a política ótima, o retorno e as probabilidades de bloqueio de cada classe sob esta política.

Tabela 3 – 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 3 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.

## 6. Considerações Finais

Neste trabalho, propôs-se um modelo de decisão markoviano para um nó de uma rede óptica, com o objetivo de encontrar uma política de alocação de comprimento de onda, que maximize o número médio de canais utilizados em cada classe do nó. Observou-se, que mesmo admitindo classes de tráfico 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, procurando políticas de controle “justas”, que são aquelas que dão a mesma probabilidade de bloqueio para todas as classes de usuários.

## Referências

- 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.
- 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.
- 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, *Opt. Netw. Mag.*, vol. 1, no. 1, pp. 47–60, Jan. 2000.