

# Comutação de Mensagens Ópticas - OMS

## Um Novo Paradigma para Redes Ópticas

Robson L. C. Canato<sup>1</sup>, Gustavo B. Figueiredo<sup>2</sup>, Juliana de Santi<sup>3</sup>,  
Nelson L. S. da Fonseca<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Computação - Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

<sup>2</sup>Departamento de Ciência da Computação – Universidade Federal da Bahia (UFBA)

<sup>3</sup>DAINF – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Curitiba

robson@lrc.ic.unicamp.br, gustavo@dcc.ufba.br

jsanti@dainf.ct.utfpr.edu.br, nfonseca@ic.unicamp.br

**Abstract.** *In this work we propose a new optical switching paradigm named Optical Message Switching (OMS). The proposed approach allies the best characteristics found in its counterparts. The main contribution of our approach is to allow resource reservation in a dynamic and flexible way, aiming at promoting efficient network utilization while providing QoS guarantees. Results obtained by simulation have shown reduction in blocking probability of flows as well as reduction in the bandwidth blocking ratio, showing the benefits of the proposed paradigm.*

**Resumo.** *Neste trabalho, propõe-se um novo paradigma para comutação óptica em redes DWDM chamado Comutação de Mensagens Ópticas. A abordagem proposta alia o melhor encontrado na Comutação de Circuitos Ópticos (OCS), na Comutação de Rajadas Ópticas (OBS) e na Comutação de Fluxos Ópticos (OFS). A principal contribuição da abordagem proposta é permitir a reserva de recursos de forma dinâmica, visando utilização eficiente de recursos com garantia de qualidade do serviço oferecido. Os resultados demonstram redução na probabilidade de bloqueio de fluxos e na probabilidade de bloqueio de bytes, o que evidencia os benefícios do paradigma proposto.*

## 1. Introdução

O volume de tráfego gerado, e a consequente utilização de recursos das redes, tem aumentado devido à expansão do acesso em banda larga, ao surgimento de novas aplicações e aos novos serviços oferecidos. De acordo com o estudo apresentado em [Cisco 2014], em 2017 o número de dispositivos conectados à rede IP será quase três vezes maior que a população global e o volume de tráfego IP gerado na Internet deve atingir 1.40 zettabytes por ano. Há, assim, um crescimento exponencial no volume de tráfego nos últimos 5 anos, e a perspectiva é a manutenção desta tendência nos próximos anos [Cisco 2014]. Ademais, a diversidade de aplicações faz com que os fluxos gerados apresentem diferentes características em função de seu tamanho, duração e taxa de transmissão [Pan et al. 2012]. Tal crescimento e diversidade de tráfego requerem das redes de transporte, arquiteturas dinâmicas que sejam capazes de manter a escalabilidade exigida pela Internet, a eficiência na utilização de recursos e a qualidade dos serviços oferecidos.

Por prover grande quantidade de banda passante em seus *backbones*, as operadoras de redes de transporte tem se valido da multiplexação de vários canais ópticos operando a *40Gbps*, ou mais recentemente a *100Gbps*, oferecida pela tecnologia DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) [Gerstel et al. 2012]. Além disso, eficiência na utilização dos recursos desta infraestrutura tem sido buscada através da eliminação de conversões óptico-elétron-óptico (O/E/O) e da proposição de novos paradigmas de comutação óptica adaptados ao novo contexto de operação das redes, o que envolve novos algoritmos e técnicas de controle sofisticados. A comutação de circuitos ópticos (*Optical Circuit Switching* - OCS) [Mukherjee 1997], a comutação de rajadas ópticas (*Optical Burst Switching* - OBS) [Qiao and Yoo 1999] e a comutação de fluxos ópticos (*Optical Flow Switching* - OFS) [Chan 2012] são paradigmas de comutação óptica largamente discutidos na literatura.

Os paradigmas de comutação óptica consideram o domínio espacial, determinando qual rota e comprimento de onda devem ser usados no provisionamento da demanda, e o domínio temporal, determinando em que instante de tempo a reserva dos recursos deverá ser realizada. Apesar de sua maturidade e ampla utilização em redes ópticas, a comutação OCS pode levar à baixa eficiência na utilização dos recursos disponíveis devido à flutuações no volume de tráfego transmitido através de caminhos ópticos com reserva de grande quantidade de banda passante por longos períodos de tempo. A comutação OFS é uma variação da OCS e, assim, sofre das mesmas limitações da OCS. Por outro lado, a comutação OBS, que é utilizada para o encaminhamento de rajadas de tráfego pelo período de tempo necessário para a transmissão de cada rajada, não garante a reserva de recursos antes da transmissão das rajadas, o que pode levar a alta probabilidade de bloqueio e a degradação da qualidade do serviço em cenários de tráfego dinâmico [Pavon-Marino and Neri 2011]. Há, assim, a necessidade de uma forma flexível de comutação, capaz de transportar simultaneamente tráfego de diferentes características.

Neste trabalho, propõe-se um novo paradigma de comutação para redes ópticas, denominado Comutação de Mensagens Ópticas (*Optical Message Switching* - OMS), que alia as melhores características encontradas nos paradigmas OCS, OFS e OBS para utilizar os recursos de forma mais eficiente e, conseqüentemente, minimizar a taxa de rejeição das demandas solicitadas. Ele opera através da reserva de recursos na forma de circuitos que operam de forma não contínua considerando os domínios de tempo e espaço. Contrapondo-se aos OCS e OBS, respectivamente, o OMS provê multiplexação estatística e desacoplamento temporal entre os planos de controle e de dados.

A reserva de recursos é feita de forma dinâmica e ajustada à real demanda de tráfego, o que permite que sejam realizadas apenas pelo período de tempo em que haverá uso efetivo dos recursos, evitando a sub-utilização dos mesmos e permitindo a multiplexação estatística de tráfego com diferentes características. Além disso, leva-se ainda em consideração o compromisso entre utilização eficiente de recursos e a satisfação de requisitos de Qualidade de Serviço (QoS). Outra contribuição desse trabalho é a proposição de um algoritmo de escalonamento simples e flexível, denominado Horizon-OMS. O Horizon-OMS baseia-se no horizonte máximo e é projetado para prover a maior ocupação possível dos recursos da rede. Simulações realizadas utilizando as topologias NSF e USA mostram que o paradigma de comutação proposto é capaz de reduzir a probabilidade de bloqueio de fluxos, além de obter valores de probabilidade de bloqueio de

bytes inferiores às abordagens OCS, OFS e OBS para todos os cenários.

O restante desse trabalho é organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta os trabalhos correlatos. A Seção 3 introduz a arquitetura proposta para a comutação de mensagens ópticas. Na Seção 4, apresenta-se um novo algoritmo para o escalonamento das mensagens. A Seção 5 descreve os resultados da avaliação da arquitetura proposta. Por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões.

## 2. Trabalhos Relacionados

Esta seção apresenta alguns trabalhos relacionados à comutação óptica tradicional e à comutação óptica híbrida, que considera múltiplos paradigmas de comutação em um mesmo nó da rede, utilizadas como base para o desenvolvimento da arquitetura de comutação e do algoritmo de escalonamento propostos.

Em [Moura 2011] é apresentada uma avaliação do impacto produzido pela rede OBS na probabilidade de bloqueio da rede OCS. Ademais, apresenta-se uma estratégia para atualização de informações capaz de diminuir as perdas na rede devido a informações desatualizadas. Em [Perello et al. 2010], avalia-se uma rede híbrida paralela com critérios de QoS como perda e atraso de pacotes. Nessa rede, o paradigma OBS é utilizado para tráfego sensível ao atraso enquanto a rede OCS é utilizada para tráfego sensível à perdas.

Em [Vu et al. 2005], são apresentados modelos analíticos para uma rede óptica com nó híbrido integrado, considerando o caso em que os circuitos possuem prioridade sobre as rajadas e o caso em que prioridades não são consideradas. Em [Wong and Zukerman 2008], apresenta-se uma arquitetura híbrida integrada não preemptiva em que as reservas da rede OBS não são descartadas em função das reservas da rede OCS. Introduzida em [Khodashenas et al. 2011], a arquitetura de nó híbrido OBS e OCS utiliza o conceito de multi granularidade (MG-OxC), onde os comutadores englobam duas matrizes de comutação em um único nó.

Diferentemente das arquiteturas de comutação híbrida existentes na literatura, que consideram diferentes paradigmas de comutação que interagem no mesmo nó, o paradigma de comutação proposto no presente trabalho, alia somente as melhores características dos paradigmas OCS, OBS e OFS visando flexibilizar o provisionamento de tráfego dinâmico, utilizar a banda passante disponível de forma eficiente e garantir qualidade para os serviços fornecidos.

## 3. Comutação de Mensagens Ópticas

O paradigma proposto, denominado Comutação de Mensagens Ópticas (*Optical Message Switching* - OMS), capitaliza as melhores características dos paradigmas de comutação de circuitos (OCS), de comutação de fluxos (OFS) e de comutação de rajadas (OBS) para aumentar o número de fluxos aceitos, bem como utilizar os recursos disponíveis de forma eficiente e garantir a qualidade do serviço oferecido.

A motivação para o desenvolvimento do paradigma OMS leva em consideração o fato de que em redes OCS a ocupação dos circuitos é baixa quando há grandes flutuações de tráfego ou longos períodos de inatividade nas fontes de tráfego. Ademais, a garantia de serviço é provida pela reserva de recursos sempre que os mesmos são necessários,

o que não implica, necessariamente, em reserva contínua de recursos. Fica evidente, portanto, que a reserva de recursos deve ser dinâmica e flexível de forma a utilizar os recursos disponíveis com maior eficiência e, conseqüentemente, reduzir a probabilidade de bloqueio de demandas e melhorar a qualidade do serviço provido.

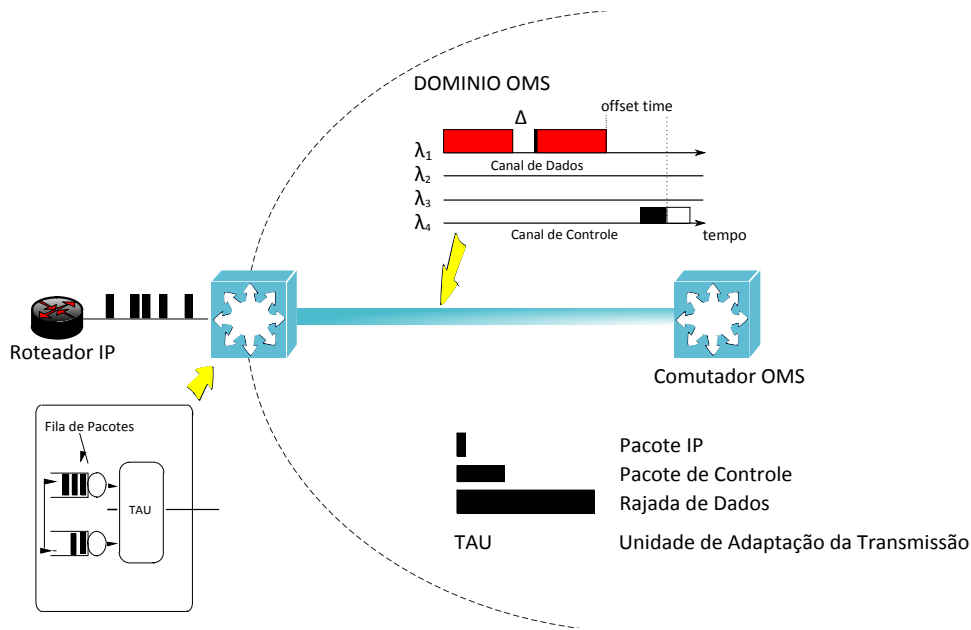
Para sanar a deficiência de dinamicidade e flexibilidade na reserva de recursos, ao invés de usar circuitos com reservas contínuas do ponto de vista temporal, a OMS propõe o uso de múltiplas reservas avançadas, através da multiplexação estatística, com menor duração, formando uma comutação híbrida. Cada reserva avançada é utilizada para transmitir uma porção dos dados, ou seja uma mensagem, do fluxo. Adicionalmente, contrapondo-se ao OBS, que provê uma relação 1:1 entre pacotes de controle e rajadas, o OMS prove uma relação de 1:N entre pacotes de controle e mensagens, significando que para um conjunto de “N” mensagens, apenas um único pacote de controle é usado.

Além disso, o número de mensagens para um fluxo é determinado em função da quantidade de dados requisitada e do tamanho máximo da mensagem em bytes, informações que são obtidas através das especificações para estabelecimento do fluxo. Assim, na abordagem proposta, utiliza-se o conjunto de reservas avançadas para comutar um conjunto de mensagens ópticas. Na comutação OMS, a duração das reservas e o tempo entre elas são projetados para coincidir com o comportamento do tráfego. Desta forma, se um dado fluxo é admitido, os recursos estarão sempre disponíveis para o tempo que são necessários. Além disso, os períodos entre reservas podem ser alocadas para comutar mensagens de outros fluxos, ou seja realizar multiplexação estatística, e, conseqüentemente, aumentar a capacidade de provisionamento de fluxos na rede. Finalmente, em um cenário de mudança de tráfego, seja por aumento da carga ou prioridade de tráfego, as últimas reservas feitas para um fluxo podem ser liberadas em favor de novas reservas, aumentando a flexibilidade para lidar com tráfego dinâmico.

### 3.1. Arquitetura da Rede

Na arquitetura para a rede OMS, apresentada na Figura 1, os nós de borda recebem fluxos de pacotes IP e os transmitem através dos enlaces de núcleo da rede após o processo de reserva de recursos, detalhado na Seção 3.2. Esse processo inicia-se após o nó de borda receber uma solicitação de transmissão de fluxo. A solicitação descreve o fluxo especificando o número de bytes a ser transmitido ( $S$ ), e a ocupação média de um comprimento de onda ( $\rho = \frac{\lambda}{u}$ , sendo  $\lambda$  o número de bytes a serem transmitidos pelo fluxo e  $u$  a velocidade do enlace). Adicionalmente, cada comutador OMS mantém o parâmetro operacional  $\beta$  que indica o menor intervalo de tempo possível de duração de reserva de recursos, e é usado para determinar o número de períodos de reservas necessários para atender um determinado tamanho de fluxo.

Os pacotes recebidos a partir de camadas superiores são armazenados em filas de acordo com o nó de destino ou a especificação de QoS. Os dados são então passados para a Unidade de Adaptação de Transmissão (*Transmission Adaptation Unit* - TAU), que é responsável pela adaptação dos dados armazenados no nó de borda para a criação de um fluxo de bits de acordo com os períodos de reserva de recursos definidos para esse fluxo. Os nós de núcleo são responsáveis por escalonar os períodos de transmissão mediante a recepção de um pacote de controle, que ocorre através do canal de controle.



**Figura 1. Esboço da arquitetura da rede OMS.**

### 3.2. Protocolo de sinalização para reserva de recursos

A reserva de recursos em uma rede OMS é realizada pela sinalização em duas vias, o que é justificado pela necessidade de garantias ao serviço provido. A sinalização em uma única via, como a utilizada na comutação OBS, não garante que os recursos sejam reservados antes do envio dos dados, podendo gerar o descarte de dados das demandas solicitadas e, conseqüentemente, a degradação do serviço.

O processo de reserva de recursos na rede OMS é ilustrado na Figura 2. A descrição  $(S, \rho)$  do fluxo a ser transmitido é mapeada pelo nó de borda para:

$$info = [N, \Delta, L],$$

onde o parâmetro  $N$  denota o número de períodos de reserva (de duração  $\beta$ ) que serão necessários para a transmissão das mensagens do fluxo; o parâmetro  $\Delta = (1 - \rho) * 2\beta/\lambda$  informa o tempo mínimo entre duas reservas de um mesmo fluxo, o que é usado para combinar a intensidade do tráfego com as reservas, de modo que se  $\rho$  está próximo à taxa de transmissão do canal,  $\Delta$  será zero e desse modo a reserva será um circuito contínuo. Por outro lado, se a utilização do canal é baixa, haverá um tempo equivalente a  $2\beta/\lambda$  entre cada período reservado e o nível de multiplexação estatística também será incrementado; o parâmetro  $L$  lista os períodos de disponibilidade dos canais de saída do nó de extremidade.

Determinados os valores de  $N$ ,  $\Delta$  e  $L$ , o nó de borda envia um pacote de controle para o nó de destino para reservar recursos para o novo fluxo. Ao receber o pacote de controle, cada nó  $i$  ao longo da rota verifica a sua própria lista de disponibilidade ( $L$ ) com a lista recebida pelo seu antecessor, a lista é atualizada e o pacote de controle é enviado ao próximo nó até alcançar o nó egresso.

Quando o pacote de controle é recebido pelo comutador do nó egresso, a primeira

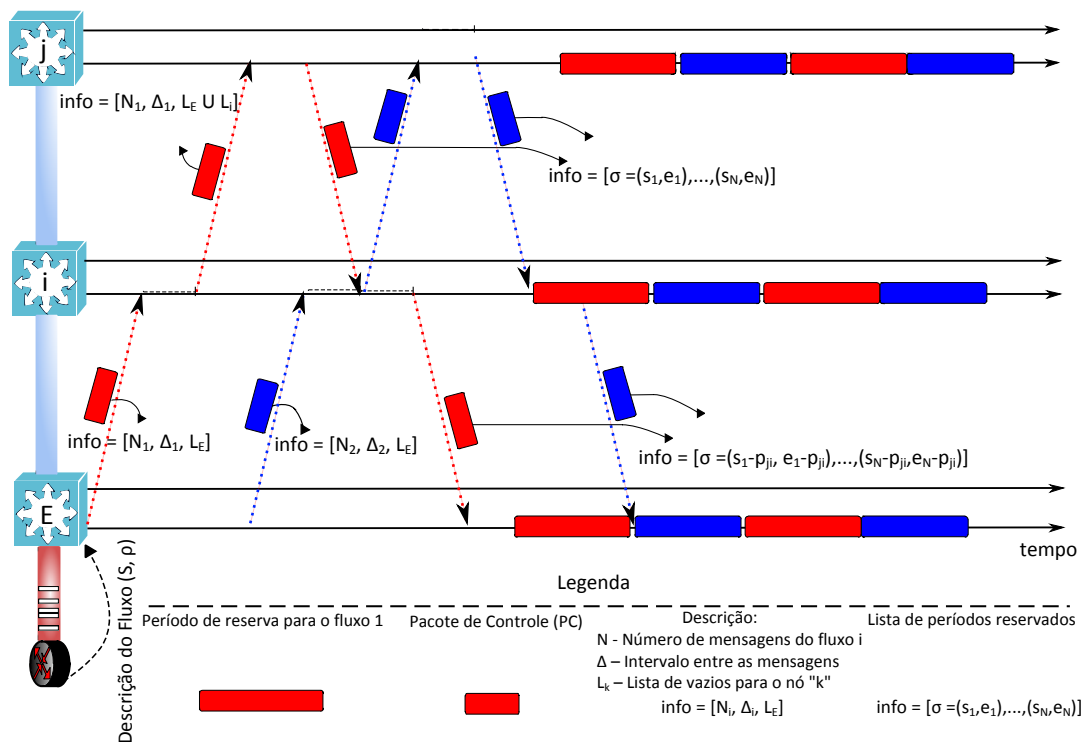


Figura 2. Processo de reserva em duas vias da rede OMS.

via é finalizada e a segunda via é inicializada. De posse da lista completa de períodos de disponibilidade nos canais ao longo da rota, o nó egresso define os períodos de tempo mais convenientes para maximizar as chances de realizar as reservas de recursos com sucesso. Em função dos períodos de tempo definidos, as reservas de recursos são escalonadas e o pacote de controle é enviado no sentido inverso da rota, na direção do nó de borda. Este segundo pacote de controle contém uma lista  $\sigma = [(s_1, e_1), \dots, (s_N, e_N)]$  com os instantes de tempo de início ( $s_i$ ) e término ( $e_i$ ) dos períodos reservados no nó egresso. Quando os nós ao longo da rota inversa recebem o pacote de controle de retorno, eles escalonam as reservas de recursos descontando o tempo de propagação da lista recebida. Se as reservas de recursos podem ser feitas em todos os nós da rota, o nó de borda recebe uma lista com os instantes de tempo em que a transmissão deverá ser feita e o processo de reserva é definido como bem sucedido.

Durante o processo de reserva, os dados recebidos de roteadores IP são armazenados no nó de borda de ingresso (Figura 1). Este fato tem consequências importantes: *i*) não há perda de dados durante o processo de reserva; *ii*) as escalas de tempo de operação do plano de dados e do plano de controle são desacopladas. Assim, diferentemente do que ocorre nas redes OBS, as restrições temporais sobre os nós de núcleo são menos rigorosas, permitindo que algoritmos de escalonamento mais eficientes possam ser usados sem aumentar a probabilidade de bloqueio global. Finalmente, mesmo que algumas das reservas não possam ser realizadas devido a contenção, a transmissão não precisa ser completamente bloqueada. Neste cenário hipotético, o nó de borda ingresso pode informar à rede cliente a quantidade de reservas bloqueadas e a degradação de transmissão pode ser avaliada. Se o cliente de rede estiver de acordo com a perda atingida, a transmissão pode ser realizada, o que demonstra a flexibilidade da abordagem proposta.

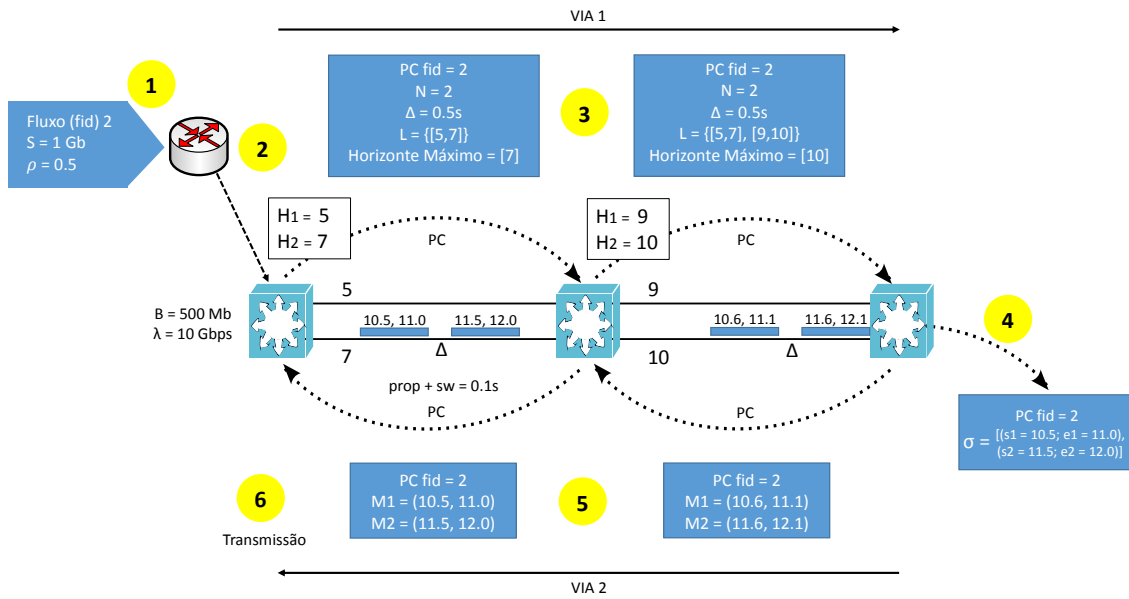


Figura 3. Processo de reserva passo-a-passo da rede OMS.

O funcionamento da arquitetura OMS é ilustrado na Figura 3. Para que um fluxo possa ser transmitido, uma solicitação é enviada para a rede (passo 1) especificando os requisitos de transmissão do fluxo ( $S = 1 \text{ Gb}$  e  $\rho = 0.5$ ), levando-se em consideração as regras de serviço acordadas com o provedor (*Service Level Agreement - SLA*). No passo 2, um pacote de controle contendo as informações de identificação do fluxo (PC fid 2), o número de períodos de reserva ( $N = 2$ ), o tempo mínimo entre duas reservas de um mesmo fluxo ( $\Delta = 0.5s$ ) e a lista dos períodos de disponibilidade dos canais ( $L$ ) é criado. Então, o pacote de controle é enviado ao primeiro nó da rota (passo 3). Para formar a lista de disponibilidade dos canais, o algoritmo Horizon-OMS, descrito em mais detalhes na próxima seção, verifica os horizontes além dos quais não existem mais reservas ( $H_1 = 5s$  e  $H_2 = 7s$ ) e escolhe o maior horizonte para compor a lista  $L = \{[7s, \dots]\}$ . É importante notar que o processo de escolha do maior horizonte é realizado em cada nó ao longo da rota, de forma que ao percorrer toda a rota, a lista dos períodos de disponibilidade de canais contenha o maior horizonte de cada enlace da rota ( $L = \{[7s, 10s]\}$ ). Quando o pacote de controle chega ao nó de egresso (passo 4), são determinados os períodos de reserva para as mensagens  $M_1$  e  $M_2$  e a lista de reserva  $\sigma = [(s_1 = 10.5s, e_1 = 11s), (s_2 = 11.5s, e_2 = 12s)]$  com o escalonamento dos instantes de tempo de início ( $s_i$ ) e término ( $e_i$ ) da transmissão de cada mensagem  $i$  é criada. Cada mensagem  $i$  é escalonada no canal com maior horizonte  $L = [(10s)]$  e a primeira via do processo de reserva de recursos é finalizada. A segunda via deste processo é iniciada atualizando-se o pacote de controle, com base na lista de mensagens e seus respectivos intervalos de tempo de escalonamento, que é enviado de volta na rota em direção ao nó ingresso (passo 5). Em cada nó no sentido inverso da rota, o escalonamento das reservas de recursos é realizado descontando o tempo de propagação e o tempo de comutação da lista recebida ( $\text{prop} + \text{sw} = 0.1ms$ ), ou seja, se a mensagem  $M_1$  iniciar sua transmissão no instante de tempo  $10.5s$  no primeiro enlace da rota e o tempo de propagação e comutação for de  $0.1ms$ , então essa mensagem começará a ser transmitida no segundo enlace da rota no instante de tempo  $10.6s$ . Finalizadas as etapas de reserva de recursos, as mensagens são enviadas

à rede (passo 6) de acordo com os intervalos de tempo definidos no escalonamento das reservas de recursos  $\sigma = [(10.5s, 11.0s), (11.5s, 12.0s), (10.6s, 11.10s), (11.6s, 12.1s)]$  no passo anterior.

#### 4. Algoritmo de escalonamento de canais

O algoritmo proposto nesta seção, denominado Horizon-OMS (Algoritmo 1), é utilizado para escalonar canais em redes de comutação de mensagens ópticas. Esse algoritmo é baseado no horizonte máximo de cada comprimento de onda visto por cada nó, onde o horizonte máximo é o tempo após o qual não existe nenhuma reserva de recursos. A notação e os parâmetros utilizados no algoritmo proposto são apresentados na Tabela 1.

Descrição	
$G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$	é o grafo que representa a topologia da rede, onde $\mathcal{V}$ é o conjunto de nós e $\mathcal{E}$ é o conjunto de enlaces
$r_{s,d}^*$	é a rota de menor custo entre o nó de origem $s$ e o nó de destino $d$
$r'_{s,d}$	representa o caminho inverso, se existir $r_{s,d} \in \mathcal{R}_{s,d}$
$PC$	é o pacote de controle contendo as informações do fluxo
$S$	é o tamanho do fluxo em bytes
$B$	é o tamanho máximo da mensagem em bytes
$M$	é a mensagem a ser enviada
$k$	é o número de fragmentos de mensagens que serão enviados e é dado por $k = \frac{S}{B}$
$\mathcal{H}_e$	é o conjunto de horizontes no enlace $e$ ( $e \in \mathcal{E}$ )
$h_j^*$	é o canal de maior horizonte, dado por $h_j^* = \max\{h_j, \forall j \in \mathcal{H}_e\}$
$\sigma$	é a lista de mensagens escalonadas. $\sigma = \{M_1 = (s_1, e_1), \dots, M_k = (s_k, e_k)\}$ , onde $s$ e $e$ são os tempos de início e término, respectivamente. $\sigma$ é um atributo de $PC$
$FB$	é uma variável binária que indica o bloqueio ou não do fluxo considerado. $FB$ é um atributo de $PC$

**Tabela 1. Notação e Parâmetros.**

O algoritmo Horizon-OMS é executado na chegada de cada requisição para estabelecimento de fluxo  $f(s, d, S, B)$ , onde  $s$  é o nó fonte,  $d$  é o nó destino,  $S$  é a quantidade de bytes a ser transmitida e  $B$  é o tamanho máximo da mensagem para o fluxo  $f$ . No Horizon-OMS, caso exista banda passante suficiente para aprovisionar  $f$  em cada enlace da rota entre a origem e o destino, a reserva de recursos é realizada. Caso não existam tais recursos, o fluxo é considerado como bloqueado.

O algoritmo proposto considera um grafo auxiliar  $G$  para representar as rotas existentes entre a origem e o destino do fluxo. Inicialmente, a rota de menor custo  $r_{s,d}^*$  é determinada utilizando-se o tradicional algoritmo de Dijkstra (Linha 2). Então, define-se o número de fragmentos de mensagem  $k$  em função da quantidade de bytes a ser transmitida e o tamanho máximo para as mensagens do fluxo (Linha 3). Estes fragmentos são considerados na montagem da lista de mensagens escalonadas  $\sigma$ , que é utilizada no pacote de controle (Linha 4).

Para cada nó na rota de ida  $r_{s,d}^*$  (Linha 5), caso exista um horizonte  $h_j^*$  grande o suficiente para alocar o número de fragmentos de mensagens  $k$  (Linha 6), a lista  $\sigma$  é atualizada e enviada no pacote de controle para o próximo nó na rota (Linha 7). Caso contrário, na Linha 9, a rota do pacote de controle é alterada para a rota inversa  $r'_{s,d}$  e a variável  $FB$  é ajustada para 1, indicando que não é possível reservar os recursos necessários para que o fluxo seja aceito.



---

**Algoritmo 1: Horizon-OMS**

---

**Entrada:**  $G, f(s, d, S, B)$   
**Saída:**  $\sigma$

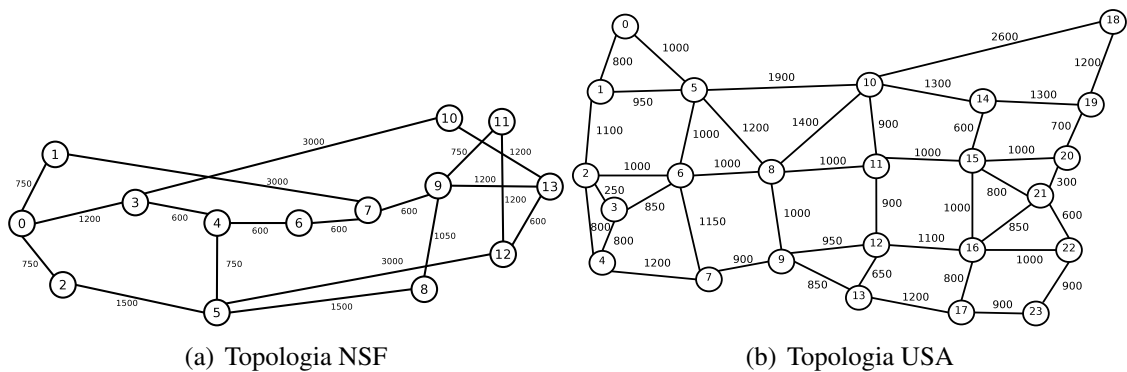
- 1  $FB \leftarrow 0$
- 2 Use o algoritmo de Dijkstra (G) para selecionar a menor rota  $r_{s,d}^*$
- 3 Determine o número de fragmentos de mensagem do fluxo  $k \leftarrow \frac{S}{B}$
- 4 Crie um pacote de controle  $PC$  com  $\sigma$  considerando  $k$  fragmentos de  $M$
- 5 **para** cada nó na rota de ida  $r_{s,d}^*$  até  $d$  **faça**
- 6 | **se** existir um horizonte  $h_j^* \in \mathcal{H}_e$  grande o suficiente para alocar  $k$  mensagens
- 7 | **então**
- 8 | | Atualize  $\sigma$  em  $PC$  e envie  $PC$  para o próximo nó
- 9 | **senão**
- 10 | | Mude a rota do  $PC$  para a rota inversa  $r'_{s,d}$  e ajuste  $FB$  para 1
- 11 **para** cada nó na rota inversa  $r'_{s,d}$  até  $s$  **faça**
- 12 | **se**  $FB = 1$  **então**
- 13 | | Libere os recursos reservados listados em  $\sigma$
- 14 | **senão**
- 15 | | Atualize  $\sigma$  em  $PC$  e envie  $PC$  para o próximo nó
- 16 Quando retornar ao nó  $s$
- 17 **se**  $FB = 0$  **então**
- 18 | Retorne  $\sigma$
- 19 **senão**
- 20 | Retorne  $\emptyset$

---

Terminado o processo de busca de horizontes na rota de ida, a rota inversa  $r'_{s,d}$  é percorrida (Linha 10) e no caso em que não foi possível encontrar horizontes suficientes, ou seja a variável  $FB = 1$  (Linha 11), os recursos previamente reservados são liberados (Linha 12). Caso os horizontes necessários em cada enlace tenham sido obtidos com sucesso, a lista  $\sigma$  é atualizada no pacote de controle que é enviado para o próximo nó na rota inversa (Linha 14). Quando o pacote de controle atinge o nó origem (Linha 15), se o valor da variável  $FB = 0$ , as mensagens escalonadas são transmitidas nos períodos de reserva de recursos descritos na lista  $\sigma$  (Linha 17). Caso contrário (Linha 19), o fluxo é considerado bloqueado.

## 5. Exemplos Numéricos

Para avaliar o desempenho do paradigma de comutação OMS foram realizadas simulações e comparações com os paradigmas de comutação OCS, OFS e OBS. Para este fim, desenvolveu-se um simulador utilizando a linguagem Python e sua biblioteca Simpy. O simulador recebe como entradas a requisição para estabelecimento de conexão de um comprimento de onda entre o nó de origem e o nó de destino ( $s-d$ ), a topologia com o custo associado a cada enlace da rota e o mecanismo de escalonamento a ser utilizado. A taxa de chegada de requisições para estabelecimento do fluxo e o tempo de duração das mesmas seguem, respectivamente, a distribuição de Poisson e a distribuição exponencial negativa. A média para o tempo de duração do fluxo é de uma unidade de tempo. As topologias utilizadas na simulações foram a topologia NSF, com 14 nós e 18 enlaces bidirecionais (Figura 4(a)) e a topologia USA, com 24 nós e 43 enlaces bidirecionais (Figura 4(b)).



**Figura 4. Topologias utilizadas nas simulações.**

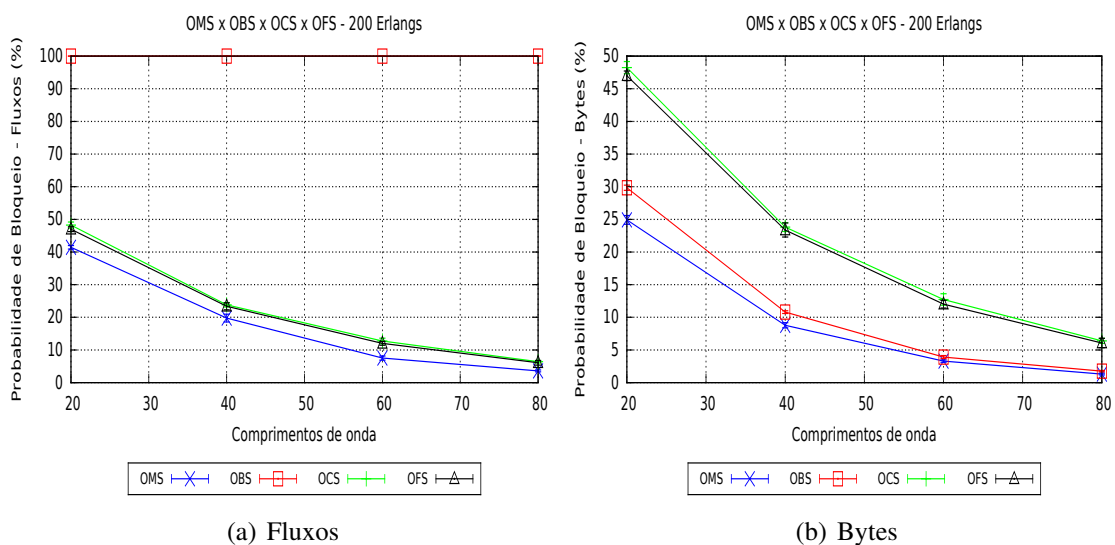
As métricas empregadas para a avaliação do paradigma proposto são a probabilidade de bloqueio de fluxos e a probabilidade de bloqueio de bytes. A probabilidade de bloqueio de fluxos é dada pela razão entre o número de fluxos bloqueados e o número total de fluxos requisitados. Um fluxo é considerado bloqueado se algum dado (byte) deste fluxo é perdido durante a transmissão. Por sua vez, a probabilidade de bloqueio de bytes é definida pela razão entre o total de bytes bloqueados e a soma dos bytes solicitados por todos os fluxos requisitados. Os bytes pertencentes a fluxos bloqueados, mas que foram transmitidos com sucesso são considerados para o total de bytes transmitidos com êxito.

Todos os gráficos apresentados nesta seção mostram valores médios obtidos a partir da execução de 10 rodadas de simulação, sendo consideradas 100.000 requisições para estabelecimento de conexão em cada rodada e utilizando-se intervalos de confiança com nível de confiança de 95%, os quais são derivados através do método da replicação independente. Esse número significativo de requisições para estabelecimento de conexão é executado de forma que o efeito transitório inicial seja desprezível, predominando o regime permanente de operação da rede.

Dois cenários são considerados nas simulações. No primeiro cenário, mantém-se a carga da rede fixa em 200 Erlangs e varia-se o número de comprimentos de onda utilizando os valores 20, 40, 60 e 80 comprimentos de onda (Figura 5). No segundo cenário, mantém-se o número de comprimentos de onda fixo em 40 e varia-se a carga oferecida à rede em 100, 200, 300, 400 e 500 Erlangs (Figura 6).

A redução na probabilidade de bloqueio de fluxo obtido pelo paradigma OMS em comparação ao paradigma OFS (Figura 5(a)) é de 11,79% e 41,19% para 20 e 80 comprimentos de onda, respectivamente. Comparado ao paradigma OCS, o OMS apresenta redução de 14,08% e 44,13% na probabilidade de bloqueio de fluxo para os mesmos comprimentos de onda. Esses resultados podem ser justificados pela reserva de recursos em múltiplos períodos, o que proporciona maior aceitação dos fluxos e, conseqüentemente, menor probabilidade de bloqueio. Os resultados para a probabilidade de bloqueio de bytes na topologia NSF em função do número de comprimentos de onda para carga de 200 Erlangs são apresentados na Figura 5(b). A probabilidade de bloqueio de bytes do paradigma OBS é reduzida em até 36% com 20 comprimentos de onda e até 71% quando o número de comprimentos de onda é aumentado para 80 em comparação com os paradigmas OFS e OCS. Diferentemente do OFS e OCS, como o paradigma OBS não visa prover garantia de serviço, as rajadas que pertencem à um fluxo bloqueado mas que foram

transmitidas com êxito são contabilizadas para o total de bytes transmitidos com sucesso. Assim, ao combinar os benefícios dos paradigmas OCS, OFS e OBS, a OMS é capaz de adequar-se ao tráfego dinâmico, através da otimização da duração e do intervalo de tempo entre os períodos de reserva. A utilização dos intervalos entre os períodos de reserva para realizar multiplexação estatística permite a comutação de mensagens de outros fluxos, diminuindo, dessa forma, tanto a probabilidade de bloqueio de fluxo (Figura 5(a)) quanto a probabilidade de bloqueio de bytes (Figura 5(b)). Além de melhorar a utilização dos recursos, aumenta-se a chance de atender aos requisitos de garantia de serviço, o que é cada vez mais exigido por aplicações emergentes.



**Figura 5. Bloqueio em função do número de comprimentos de onda - Topologia NSF.**

As Figuras 6(a) e 6(b) apresentam, respectivamente, os resultados para a probabilidade de bloqueio de fluxos e a probabilidade de bloqueio de bytes no cenário com capacidade de 40 comprimentos de onda e variação da carga oferecida à rede.

Os valores de probabilidade de bloqueio de fluxo em função da carga para 40 comprimentos de onda na topologia NSF são apresentados na Figura 6(a). A redução da probabilidade de bloqueio de fluxo gerado pelo paradigma OMS é de 45,41% e 46,95% em comparação com os valores obtidos para a comutação OCS e OFS, respectivamente, para 100 Erlangs. À medida que a carga na rede é aumentada, os valores de probabilidade de bloqueio produzidos pelos paradigmas OMS, OCS e OFS vão se aproximando. Esse comportamento é esperado, uma vez que os recursos tendem a se esgotar. Assim como no primeiro cenário, fica evidenciado na Figura 6(a) que os valores de probabilidade de bloqueio de fluxo gerado para o paradigma OBS é influenciado pelo descarte de qualquer rajada, levando ao bloqueio do fluxo, o que não é necessariamente crítico levando em consideração que o paradigma de comutação OBS não tem como prioridade oferecer garantia de serviço. A Figura 6(b) apresenta os valores obtidos para a probabilidade de bloqueio de bytes em função da carga para 40 comprimentos de onda na topologia NSF. A probabilidade de bloqueio de bytes gerada na OMS é reduzida em 20,10%, 75,04% e 75,74%, sob a carga de 100 Erlangs com relação aos valores gerados nos pa-

radigmas OBS, OCS e OFS, respectivamente. Mesmo com o aumento da carga para 500 Erlangs, a OMS mantém o comportamento de redução da probabilidade de bloqueio de bytes de 31,75%, 54,72% e 55,28% em comparação ao paradigma OBS, OCS e OFS, respectivamente. Esses resultados confirmam que os benefícios de garantia de reserva de recursos para múltiplos períodos e a multiplexação estatística possibilitam a utilização mais eficiente da capacidade residual da rede, contribuindo para o aumento da chance de acomodação dos bytes transmitidos, o que pode ser verificado na Figura 6(b).

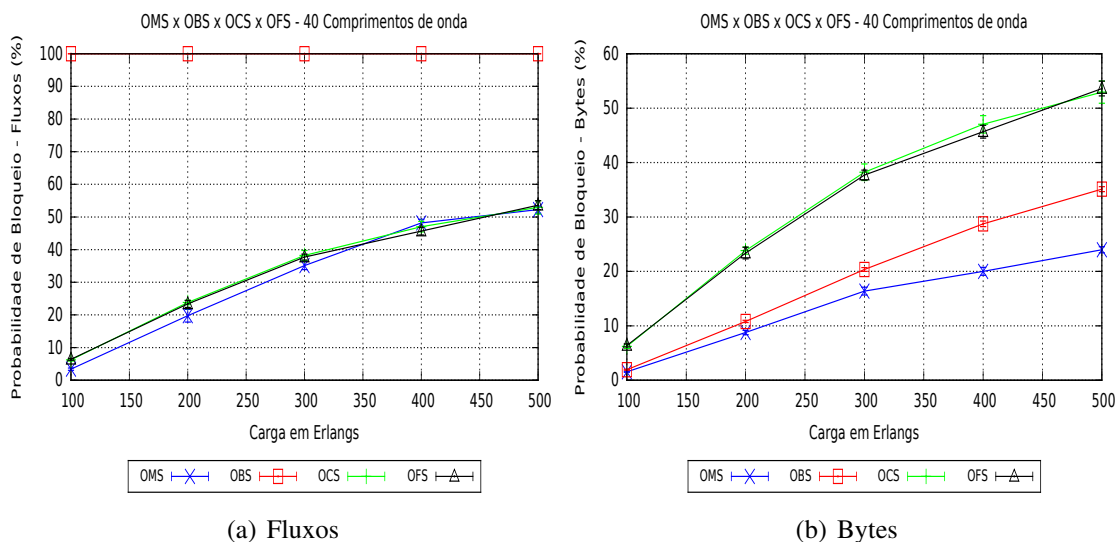


Figura 6. Bloqueio em função da carga - Topologia NSF.

As Tabelas 2 e 3 apresentam os resumos de redução da probabilidade de bloqueio de fluxos e de bytes do paradigma OMS em comparação com os paradigmas OBS, OCS e OFS para as topologias NSF e USA, respectivamente. Como pode ser observado, foram considerados para essa avaliação, uma variação da carga oferecida à rede em 100, 200, 300, 400 e 500 Erlangs, utilizando os valores 20, 40, 60 e 80 comprimentos de onda. Os resultados de redução da probabilidade de bloqueio de fluxo apresentados na Tabela 2 são confirmadas em 100,00%, 70,00% e 70,00% dos valores para o paradigma OMS em relação aos paradigmas OBS, OCS e OFS respectivamente. Em apenas 30,00% desses valores a OMS teve desempenho inferior aos paradigmas OCS e OFS para as cargas de 400 e 500 Erlangs, não ultrapassando, no pior caso, 5,52%. Além disso, os valores médios de redução da probabilidade de bloqueio de fluxo apresentados para a OMS são de 70,34%, 16,99% e 16,92% em comparação ao OBS, OCS e OBS, respectivamente. Ademais, como pode-se observar na Tabela 2, o paradigma OMS reduz a probabilidade de bloqueio de bytes em todos os casos verificados na topologia NSF, sendo os valores de redução média de 26,73%, 64,43% e 64,27% em comparação à OBS, OCS e OFS, respectivamente.

Os valores obtidos de redução da probabilidade de bloqueio de fluxos e de bytes para a topologia USA são apresentados na Tabela 3. Assim como pode ser verificado na Tabela 2, a OMS apresentou na maioria dos resultados valores de redução de probabilidade de bloqueio de fluxos em relação aos paradigmas OBS, OCS e OBS. Nos resultados em que a OMS teve desempenho inferior aos paradigmas OCS e OFS esses valores não

Redução na Probabilidade de Bloqueio - %							
Carga (Erlangs)	Comprimentos de onda	OMS x OBS		OMS x OCS		OMS x OFS	
		Fluxos	Bytes	Fluxos	Bytes	Fluxos	Bytes
100	20	84,68	12,88	38,94	58,23	39,64	58,71
	40	99,61	20,10	45,41	75,04	46,95	75,74
	60	99,32	8,57	62,01	82,12	59,52	80,95
	80	99,83	50,00	63,41	90,24	71,70	92,45
200	20	58,55	16,49	14,08	48,34	11,79	46,97
	40	80,24	18,80	17,01	63,17	15,45	62,47
	60	92,49	15,86	41,01	74,16	37,47	72,61
	80	96,43	25,14	44,13	79,50	41,19	78,42
300	20	40,35	24,42	0,33	47,00	1,13	47,42
	40	64,91	19,52	8,19	57,17	6,92	56,58
	60	80,47	34,02	15,42	69,68	16,47	70,06
	80	85,62	37,50	1,98	77,16	4,52	77,76
400	20	29,70	29,23	-3,37	47,27	-5,52	46,17
	40	51,84	30,38	-2,40	57,45	-5,45	56,19
	60	67,76	34,06	5,29	67,07	6,17	67,37
	80	75,89	41,72	-5,15	74,05	-3,12	74,55
500	20	26,36	28,38	-2,26	42,84	-2,33	42,80
	40	47,75	31,75	1,30	54,72	2,52	55,28
	60	59,22	31,81	-4,24	60,33	-3,48	60,62
	80	68,82	24,02	-1,33	62,98	-3,21	62,30
Redução Média		70,34	26,73	16,99	64,43	16,92	64,27

**Tabela 2. Bloqueio de fluxos e bytes - Topologia NSF.**

excederam a 4,60% no pior caso. No entanto, mesmo considerando esses resultados, a redução de probabilidade de bloqueio de fluxos média obtida para a OMS em comparação a OBS, OCS e OFS é de 78,67%, 21,34% e 19,04%, respectivamente. Podemos observar, ainda, na Tabela 3 que o OMS reduziu a probabilidade de bloqueio de bytes em no mínimo 95,00% dos resultados, tendo como valores médios 17,66%, 66,91% e 65,97% em comparação ao OBS, OCS e OFS, respectivamente.

Redução na Probabilidade de Bloqueio - %							
Carga (Erlangs)	Comprimentos de onda	OMS x OBS		OMS x OCS		OMS x OFS	
		Fluxos	Bytes	Fluxos	Bytes	Fluxos	Bytes
100	20	90,75	15,55	44,61	63,89	44,51	63,83
	40	98,75	0,00	58,43	78,78	56,27	77,68
	60	99,83	33,33	76,06	85,92	77,92	87,01
	80	99,88	-50,00	76,00	88,00	70,00	85,00
200	20	70,42	17,24	16,70	54,18	16,20	53,91
	40	88,32	14,21	27,09	67,60	22,34	65,49
	60	95,24	19,70	29,79	75,96	28,42	75,49
	80	97,91	5,41	34,48	78,06	29,15	76,27
300	20	56,21	23,47	8,83	51,95	8,79	51,93
	40	77,39	22,55	15,98	64,14	10,98	62,01
	60	87,66	24,05	21,50	69,47	17,95	68,09
	80	92,72	21,80	17,08	76,31	13,54	75,30
400	20	44,73	26,36	2,13	51,46	0,38	50,59
	40	64,88	24,21	-0,03	58,90	-2,63	57,83
	60	77,23	29,67	3,15	70,57	-1,20	69,24
	80	84,75	10,63	-4,60	70,03	-2,62	70,59
500	20	37,46	29,53	0,82	49,14	-2,39	47,50
	40	58,71	30,64	0,34	57,93	-1,70	57,07
	60	70,99	27,13	0,58	59,32	-2,22	58,17
	80	79,67	27,70	-2,21	66,67	-2,94	66,43
Redução Média		78,67	17,66	21,34	66,91	19,04	65,97

**Tabela 3. Bloqueio de fluxos e bytes - Topologia USA.**

## 6. Conclusões

Este artigo apresentou um novo paradigma de comutação para redes ópticas denominado comutação de mensagens ópticas - OMS. O paradigma proposto alia o melhor encontrado nos paradigmas OCS, OFS e OBS, sendo capaz de adequar-se ao tráfego dinâmico gerado por aplicações emergentes. Além disso, introduzimos o algoritmo Horizon-OMS para escalonamento das mensagens. Ao prover flexibilidade para atender novas demandas de tráfego, o paradigma OMS, utilizando o algoritmo de escalonamento Horizon-OMS, teve desempenho superior aos paradigmas OCS, OFS e OBS, reduzindo a probabilidade de bloqueio e provendo garantia de serviço. Como trabalho futuro, pretende-se desenvolver variações do algoritmo de escalonamento com diferentes requisitos.

## Referências

- Chan, V. (2012). Optical flow switching networks. *Proceedings of the IEEE*, 100(5):1079–1091.
- Cisco (2014). The Zettabyte Era - Trends and Analysis. disponível em: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html>. acessado em 2015.
- Gerstel, O., Jinno, M., Lord, A., and Yoo, S. (2012). Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer? *Communications Magazine, IEEE*, 50(2):s12–s20.
- Khodashenas, P., Perello, J., Spadaro, S., Comellas, J., and Junyent, G. (2011). A feedback-based hybrid obs/ocs architecture with fast-over-slow capability. In *Optical Network Design and Modeling (ONDM), Int. Conf. on*, pages 1–6.
- Moura, I., M. F. M. J. S. A. (2011). Impacto da comutação obs na probabilidade de bloqueio ocs em redes híbridas ocs/obs. In XXX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC, pages 698–711.
- Mukherjee, B. (1997). *Optical Communication Networks, Ed. MacGraw-Hill*.
- Pan, T., Guo, X., Zhang, C., Meng, W., and Liu, B. (2012). Alfe: A replacement policy to cache elephant flows in the presence of mice flooding. In *Communications (ICC), IEEE Int. Conf. on*, pages 2961–2965.
- Pavon-Marino, P. and Neri, F. (2011). On the myths of optical burst switching. *Communications, IEEE Transactions on*, 59(9):2574–2584.
- Perello, J., de Guinea, N., Spadaro, S., Junyent, G., and Comellas, J. (2010). Performance evaluation of a hybrid obs/ocs network with qos differentiation based on packet loss/delay requirements. In *Transparent Opt. Networks (ICTON), Int. Conf. on*, pages 1–4.
- Qiao, C. and Yoo, M. (1999). Optical burst switching (obs) - a new paradigm for an optical internet. *Journal of High Speed Networks*, 8:69–84.
- Vu, H. L., Zalesky, A., Wong, E., Rosberg, Z., Bilgrami, S., Zukerman, M., and Tucker, R. (2005). Scalable performance evaluation of a hybrid optical switch. *Lightwave Technology, Journal of*, 23(10):2961–2973.
- Wong, E. and Zukerman, M. (2008). An optical hybrid switch with circuit queueing for burst clearing. *Lightwave Technology, Journal of*, 26(21):3509–3527.