

## Seleção de paradigmas em redes ópticas híbridas integradas

Lucas P. Melo<sup>1</sup>, Messias Bittencourt<sup>1</sup>, Gustavo B. Figueiredo<sup>1</sup>, Tertuliano Franco<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciência Computação – Universidade Federal da Bahia (UFBA)

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

{lucaspm, messiasbf, gustavo}@dcc.ufba.br, tertuliano@ufba.br

**Abstract.** *This paper proposes a decision function aimed at choosing the most appropriated optical switching paradigm to transport flows in a hybrid optical network. The decision function has the advantage of being a simple function that considers parameters like utilization, statistical multiplexing gain and signaling cost associated with each paradigm considered. Moreover, a simulation based performance evaluation that shows the impact of the chosen criteria in the network state is presented.*

**Resumo.** *Este artigo propõe uma função para decisão sobre o paradigma a ser usado no transporte de fluxos em redes ópticas híbridas integradas. A função de decisão tem como vantagem ser uma função simples que considera como parâmetros a utilização, o ganho em multiplexação estatística e o custo associado à sinalização em cada paradigma considerado. Adicionalmente, é apresentada uma avaliação de desempenho realizada via simulação que mostra o impacto do critério de decisão no estado da rede.*

### 1. Introdução

A pesquisa realizada sobre paradigmas de comutação óptica visa a proposição ou melhoria de um dado paradigma, dadas as ineficiências observadas em outros paradigmas. Isso tem levado à proposição de diversos paradigmas de comutação óptica tais como comutação de circuitos ópticos (do inglês *Optical Circuit Switching* - OCS) [Barker et al. 2005], comutação de rajadas ópticas (do inglês *Optical Burst Switching* - OBS) [Qiao and Yoo 1999], comutação de pacotes ópticos (do inglês *Optical Packet Switching* - OPS) [Qiao and Yoo 1999], além de inúmeros protocolos e algoritmos sempre visando ajustá-los a determinado cenário. Contudo, recentemente, uma segunda via tem sido adotada que é a integração de diferentes paradigmas em uma arquitetura de rede visando obter os benefícios desses paradigmas, enquanto minimiza as suas deficiências, dando origem a um novo modelo de rede denominado Redes Ópticas Híbridas (ROH).

Uma dessas arquiteturas é chamada de rede híbrida integrada. Nessa arquitetura, a mesma infraestrutura de rede é utilizada para a realizar a transmissão do tráfego tanto usando o paradigma OCS, quanto usando o paradigma OBS. Assim, o mesmo conjunto de equipamentos pode ser utilizado, diminuindo os custos associados. Para garantir a interoperabilidade entre os paradigmas, um plano de controle eletrônico utilizado para a

reserva dos recursos na rede é formado pela combinação dos planos de controle da rede OCS e da rede OBS.

O custo reduzido torna o modelo integrado mais vantajoso que os demais do ponto de vista financeiro [Buysse et al. 2009]. Entretanto, diversos desafios precisam ser transpostos de forma que a rede experimente a menor probabilidade de bloqueio e utilização ao transportar diferentes tipos de fluxos pela mesma infraestrutura física usando diferentes paradigmas de comutação óptica. Um desses desafios é decidir sobre qual paradigma será usado para a transmissão de um dado fluxo na rede óptica.

Este artigo propõe uma função de decisão que é responsável pela indicação de qual paradigma utilizar, entre os paradigmas OBS e OCS, em função das características do fluxo a ser transportado na rede e do efeito que este fluxo terá sobre a rede. Para tal, são consideradas a utilização provocada na rede ao se transportar o fluxo em cada paradigma, o ganho em multiplexação estatística e o custo de sinalização de cada um dos paradigmas. Resultados mostram que a operação da rede pode guiar a escolha dos paradigmas ao usar pesos que mais adequados aos critérios considerados importantes pela administradora da rede.

O resto do artigo está organizado como segue: a Seção 2 apresenta a arquitetura das redes híbridas e trabalhos relacionados, a Seção 3 apresenta a abordagem proposta para seleção de paradigmas em redes ópticas híbridas integradas, a Seção 4 mostra os exemplos numéricos e por fim a Seção 5 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

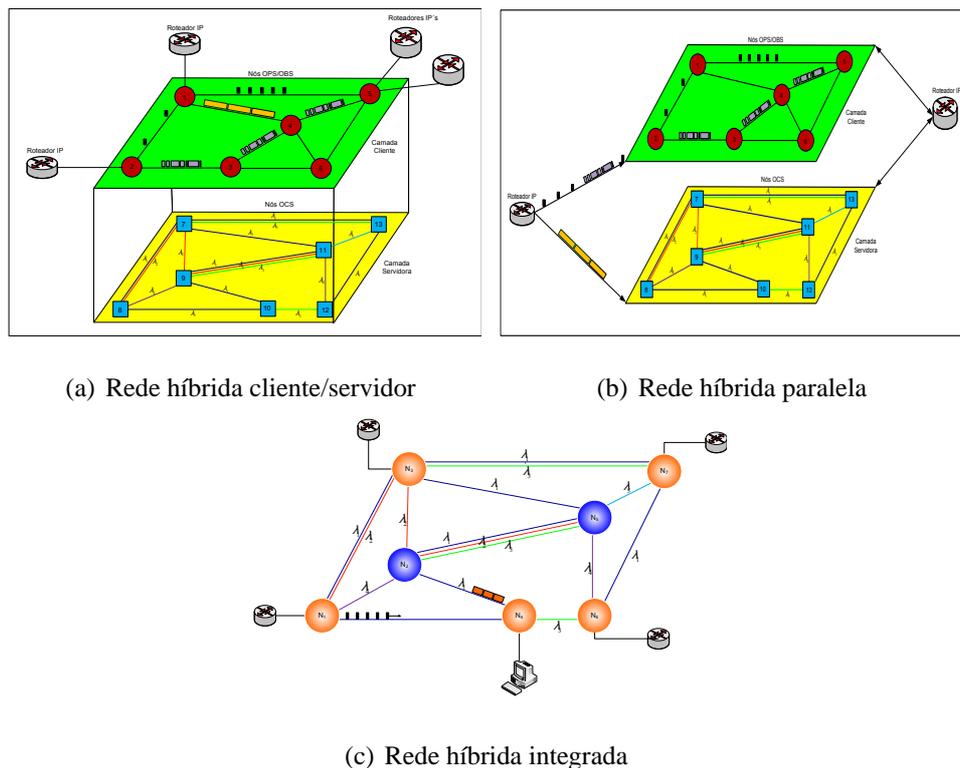
## **2. Redes ópticas híbridas**

O estudo de redes ópticas híbridas WDM é um tema que tem despertado a atenção da comunidade de redes ópticas e obviamente, diversos trabalhos tem sido propostos na literatura recentemente.

Buysse et. al em [Buysse et al. 2009], propõe uma classificação baseada no grau de interação e integração das tecnologias de redes OBS e OCS. Em tal classificação, as Redes Ópticas Híbridas são divididas em três arquiteturas: Redes Ópticas Híbridas Cliente/Servidor; Redes Ópticas Híbridas Paralelas e Redes Ópticas Híbridas Integradas.

Na primeira categoria, a estrutura de comutação da rede óptica é agrupada em uma hierarquia de duas camadas, onde a camada superior é a camada cliente, representada pela tecnologia de comutação óptica OBS. Esta camada solicita um determinado serviço de transporte óptico de dados para a camada inferior, denominada de camada servidora, e que é representada pela tecnologia de comutação óptica OCS, como pode ser observado na Figura 1(a), que ilustra o comportamento de tráfego da rede óptica híbrida cliente/servidor.

A segunda categoria refere-se ao modelo de rede óptica híbrida paralela. Neste modelo, a rede óptica é formada por duas camadas paralelas e independentes, como pode ser observado na ilustração da Figura 1(b). Observe neste modelo que a estrutura de comutação da camada superior é constituída única e exclusivamente pela tecnologia óptica OBS ao passo que na camada inferior essa mesma estrutura é formada pela rede OCS. Para a seleção do tráfego que será direcionado para cada uma das camadas, um nó periférico inteligente seleciona a camada de comutação com base na solicitação do usuário, no modelo de tráfego de entrada ou ambos.



**Figura 1. Modelos de redes ópticas híbridas.**

A terceira categoria refere-se às Redes Ópticas Híbridas Integradas, onde duas ou mais tecnologias de redes ópticas são integradas em uma só para oferecer um serviços de transporte de dados. Desta forma, todos os nós da rede óptica híbrida integrada compartilham os mesmos recursos de largura de banda, compartilhamento de recursos, protocolos, comprimentos de onda, protocolo de sinalização. Nesta categoria, um nó externo solicita a um nó de borda da rede óptica um serviço de transporte de dados. O nó de borda, baseado nas características do tráfego ou nos parâmetros de qualidade de serviço, configura um paradigma óptico (OCS ou OBS) para o transporte do tráfego solicitado. Em um nível lógico, os comutadores OBS e OCS não têm conhecimento entre si, e a escolha entre eles é feita exclusivamente no ponto de entrada das unidades de dados na borda da rede.

## 2.1. Trabalhos relacionados

Em [Khodashenas et al. 2011] uma arquitetura de nó híbrido OBS/OCS é proposta. Esta arquitetura parte do conceito de MG-OXC (do inglês *Multi-Granular Optical Cross Connect*) que são comutadores que englobam duas matrizes de comutação em um único nó.

Em [Wang et al. 2009] um modelo de rede híbrida integrada, denominado Hy-LABS (do inglês *Hybrid Lightpath and Burst Switching*) foi proposto. Nesta arquitetura, os pacotes são encaminhados prioritariamente pela rede OCS em caminhos ópticos estabelecidos do nó de borda ao nó de destino dos pacotes. A topologia virtual da rede OCS é inicialmente construída usando programação linear com uma matriz de tráfego estática. Assim, quando um pacote chega ao nó de borda, o mesmo realiza uma busca à procura de caminhos ópticos que conectem o nó de borda ao nó de destino. Caso não existam caminhos ópticos diretos, ou os existentes não possuam capacidade para transportar os

pacotes, uma nova busca procurando caminhos com mais saltos é realizada. Caso não obtenha sucesso, os pacotes são encaminhados usando-se o paradigma OBS.

Em [Wong and Zukerman 2008], é proposta uma arquitetura de rede óptica híbrida integrada não preemptiva em que as reservas da rede OBS não são descartadas em função das reservas da rede OCS. Na proposta, quando um pedido de reserva para rede OCS chega ao nó de borda, caso o único comprimento de onda disponível esteja sendo utilizado por rajadas, a requisição do circuito é enfileirada até que as rajadas tenham sido transmitidas.

Em [Vu et al. 2005] são propostos modelos analíticos para um nó da rede óptica híbrida integrada considerando tanto o caso em que os circuitos possuem prioridade sobre as rajadas quanto o caso em que não existe prioridade entre os paradigmas de comutação óptica.

Em [Saha et al. 2012] é apresentada uma arquitetura de rede óptica híbrida para a interconexão de DCN (do inglês *Data Center Networks*), denominada *HyScaleII*. Nessa arquitetura, OCS e OBS são usadas para transmitir fluxos de baixa e alta granularidade, respectivamente. O artigo propõe como a topologia da rede deve ser organizada de forma que seja escalável e tolerante a falhas, além de capaz de suportar o grande volume de dados transmitido. Além disso, os autores apresentam um algoritmo de roteamento capaz de levar vantagem da topologia empregada, aumentando assim o desempenho da rede.

Em [Menon et al. 2009], é proposta uma arquitetura de rede híbrida baseada no modelo cliente/servidor em que o tráfego excedente dos circuitos já provisionados é encaminhado pela rede através do paradigma OBS. Inicialmente circuitos de diferentes classes de serviço, denominados circuitos primários, são criados entre os múltiplos comutadores híbridos de borda. Assim, quando um pacote de controle associado a uma rajada chega a um dos nós, é verificado, usando informações relativas ao seu destino e prioridade, se existe um circuito primário que possa transmitir a rajada. Caso sim, a mesma é encaminhada. Caso não exista, canais adicionais são inspecionados à procura de algum que possa acomodar a demanda. Apesar de simples a proposta, ela não especifica como os recursos devem ser reservados, como as rajadas são criadas e como é o processo de seleção de canal.

Em [Xue et al. 2005] é realizada uma avaliação de desempenho das redes OCS e OBS. Os resultados são bem incipientes para que sejam efetivamente considerados mas apontam para uma maior utilização das redes OBS em relação às redes OCS. Já em [Perelló and et al. 2010] é realizada uma avaliação de desempenho de uma rede híbrida OBS/OCS levando-se em consideração critérios de QoS como perda e atraso de pacotes. O artigo considera uma rede híbrida paralela em que a rede OBS é utilizada para tráfego sensível a atraso enquanto a rede OCS é utilizada para tráfego sensível a perdas.

Em [Moura et al. 2011] é apresentada uma avaliação de desempenho quantificando o impacto produzido pela rede OBS na probabilidade de bloqueio da rede OCS. Além disso, o artigo apresenta uma estratégia para atualização de informações capaz de diminuir as perdas na rede devido a informações desatualizadas.

### 3. Seleção de paradigmas em Redes Ópticas Híbridas

Quando um fluxo chega ao nó de borda, é necessário que o nó decida a respeito de qual paradigma de comutação óptica será utilizado. Nesta seção, propõe-se uma política para decisão sobre qual paradigma de comutação óptica deverá ser transmitido o fluxo, que considera a utilização da rede, o ganho em multiplexação estatística e o custo de sinalização associado a cada um dos paradigmas.

#### 3.1. Modelo de rede adotado

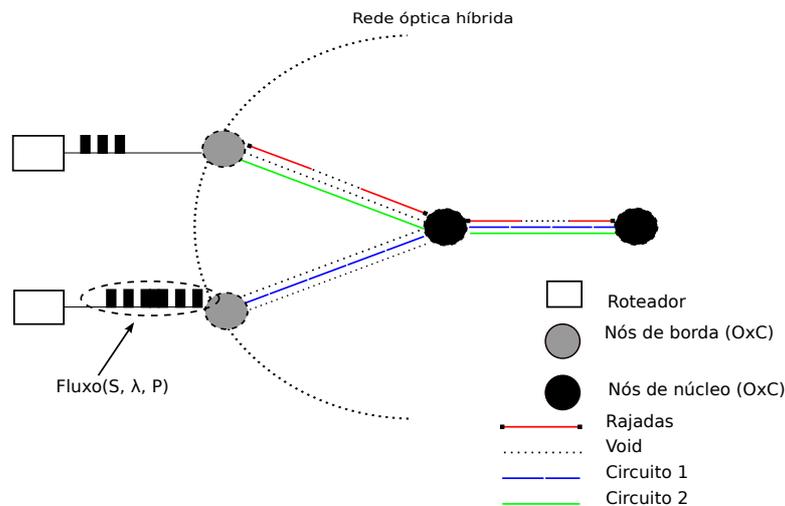


Figura 2. Modelo adotado

A rede considerada nesse trabalho, ilustrada na Figura 2, é uma rede *overlay* IP sobre WDM em que os pacotes são transmitidos na rede óptica através de circuitos ou de rajadas ópticas, conforme o paradigma de comutação óptica selecionado.

Antes dos pacotes serem transmitidos, o nó de borda deve determinar qual paradigma usar. Para tanto, assume-se que cada fluxo  $f$  segue um SLA (do inglês *Service Level Agreement*) e é caracterizado pela tupla  $(S, \lambda, P)$ , onde  $S$  é a quantidade de bytes a ser transmitida pelo fluxo,  $\lambda$  é a taxa média de envio dos pacotes, e  $P$  a MTU usada na rede IP. Assume-se que tanto a taxa de chegada de fluxos quanto a taxa de chegadas dos pacotes que compõem os fluxos seguem a distribuição de *Poisson* e que o tamanho dos pacotes segue a distribuição *Beta(a,b)* [Castro 2011] com parâmetros  $a$  e  $b$ .

A rede óptica é composta por nós OXC (do inglês *Optical Cross Connects*) que atuam ora como nós de borda e ora como nós de núcleo. Em outras palavras assume-se que todo nó da rede óptica pode estar conectado a redes de acesso trazendo tráfego IP e que todos tem a capacidade de comutar o sinal óptico usando conversão total de comprimentos de onda.

Se o paradigma escolhido para transmissão for o OCS, um circuito dedicado é estabelecido seguindo um processo de reserva bidirecional em que um pacote de controle é enviado ao núcleo da rede a fim de realizar a reserva dos recursos. Ao final do processo, em havendo recursos em todos os nós, o nó de destino envia uma mensagem de confirmação ao nó de origem. Só após a chegada da confirmação ao nó de origem

os dados são transmitidos usando o circuito. Ao término da transmissão, o mesmo processo se repete para a liberação dos recursos previamente reservados. O algoritmo de RWA implementado foi o *first-fit* realizado no menor caminho considerando o número de enlaces.

Caso o paradigma OBS seja selecionado, os pacotes IP são encaminhados a filas de montagem de acordo com seu destino. O algoritmo usado na montagem é o *Min-Burst-Length Max-Assembly-Period* [Cao et al. 2002] que adota um tempo máximo de montagem igual a  $T$  unidades de tempo e produz rajadas de tamanho mínimo igual a  $l$  bytes e máximo igual a  $L$  bytes. Após montada a rajada, os recursos são reservados unidirecionalmente, seguindo o protocolo JET (do inglês *Just Enough Time*) [Qiao and Yoo 1999]. O algoritmo de escalonamento é o LAUC-VF.

### 3.2. O processo de seleção de paradigmas

O processo de decisão sobre qual paradigma utilizar é proposto baseado num princípio empírico e heurístico de lucro potencial da rede gerado por um dado paradigma de comutação óptica  $i$ . Ele é definido por  $\mathcal{L}_i$  e apresentado na Equação (1).

$$\mathcal{L}_i = \alpha U_i + \beta G_i - \gamma C_i \quad (1)$$

onde,  $U_i$  é a utilização,  $G_i$  o ganho e  $C_i$  o custo gerados pelo paradigma  $i = \{b, c\}$ , representando comutação de rajadas e de circuitos, respectivamente. Finalmente,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são fatores de operação que podem ser escolhidos pelo operador de rede para relativizar a importância de cada parâmetro da Equação (1) dentro do seu contexto.

O lucro potencial é usado como critério de escolha em que o paradigma que produzir o maior valor será aquele escolhido para transportar o fluxo a ser transmitido. Ele considera três métricas que são utilizadas para inferir o efeito na rede causado pela transmissão de um fluxo  $f$  usando cada um dos paradigmas. As métricas adotadas neste trabalho são a utilização da rede, o ganho em multiplexação estatística e o custo de sinalização para reserva dos recursos e seus cálculos serão apresentados nas nas subseções 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3, respectivamente.

#### 3.2.1. Cálculo da utilização para os paradigmas OBS e OCS

A utilização é definida como o tempo médio em que a rede está ocupada realizando a transmissão dos dados, assumindo-se sucesso na reserva dos recursos para o circuito, no caso de OCS e para as rajadas, no caso de OBS. A ideia é que, considerando as características do fluxo, evite-se fazer uma escolha que provoque baixa utilização dos recursos da rede.

Para o paradigma OBS, considerando o protocolo de reservas JET, cada reserva é feita pelo período de duração correspondente a uma rajada. Além disso, os recursos não são reservados no período correspondente à chegada do pacote de controle ao nó e a chegada da rajada. Assim, a utilização da rede do paradigma OBS é igual a 1.

O cálculo da utilização do paradigma OCS é feito modelando-se um circuito como

uma fila M/G/1 com os seguintes parâmetros:

$\lambda$	Taxa de chegada de pacote do fluxo
$\mathbb{E}[S]$	Tempo médio de serviço
$C_v$	coeficiente de variação

Seja  $X$  uma variável aleatória que modela o tamanho dos pacotes. Assumindo-se que  $X$  segue a distribuição Beta com parâmetros  $a$  e  $b$ , tem-se:

$$\mathbb{E}[X] = \frac{a}{a+b} \quad (2)$$

$$\text{Var}(X) = \frac{ab}{(a+b)^2(a+b+1)} \quad (3)$$

Dado que a transmissão dos pacotes pelo circuito óptico é feita na taxa de transmissão do canal,  $V$ , tem-se:

$$\mathbb{E}[S] = \frac{\mathbb{E}[X]}{V}.$$

Finalmente, a utilização do circuito é dada por:

$$\rho = \lambda \mathbb{E}[S] \quad (4)$$

A Equação (5) sumariza a utilização dos diversos paradigmas:

$$U_i = \begin{cases} 1 & , \text{ se } i = b; \\ \lambda \mathbb{E}[S] & , \text{ se } i = c. \end{cases} \quad (5)$$

### 3.2.2. Cálculo do ganho em multiplexação estatística dos paradigmas OBS e OCS

O ganho em multiplexação estatística é definido de forma aproximada como a probabilidade de que outro fluxo  $f'$  seja acomodado no mesmo comprimento de onda utilizado para acomodar  $f$  (assumindo que todo o fluxo  $f$  utilizará o mesmo comprimento de onda), usando um paradigma em particular.

Obviamente, o ganho em multiplexação estatística dado pelo paradigma OCS é nulo, já que uma vez feita a reserva dos recursos, outro fluxo não poderá usar o mesmo comprimento de onda. Assim,

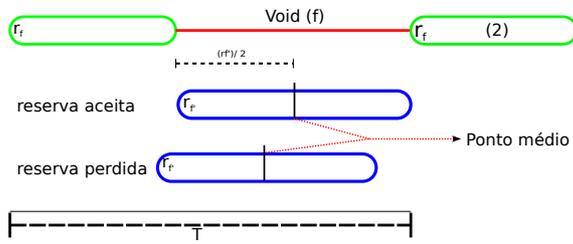
$$G_c = 0 \quad (6)$$

Dessa forma, nesta seção será apresentada uma derivação aproximada para o ganho em multiplexação estatística produzido pelo paradigma OBS.

Sejam  $r_f$  e  $r_{f'}$  reservas associadas a rajadas oriundas dos fluxos  $f$  e  $f'$ , respectivamente e considerando que  $r_f$  foi realizada a partir do tempo 0, para que uma reserva de  $f'$  possa ser feita no mesmo comprimento de onda, é necessário que: *i*) o seu tamanho (denotado aqui por  $|r_{f'}|$ ) seja menor do que os *voids* criados pelo fluxo  $f$  e que *ii*) o ponto médio da reserva correspondente à rajada de  $r_{f'}$  atinja distância pelo menos  $|r_{f'}|/2$  de cada extremo do intervalo *void* gerado por  $f$ , como ilustrado na Figura 3.

Adicionalmente, a figura ilustra o fato de que um outro período de montagem de rajadas do fluxo  $f$  (representado pela linha tracejada acima do símbolo  $T$ ) inicia-se imediatamente após o envio da rajada antecedente. Supondo que o intervalo da reserva

$r_{f'}$  é disposto de maneira uniforme no intervalo  $T$ , o que é uma hipótese razoável para tempos longos, já que os processos  $f$  e  $f'$  são independentes, o ponto médio do intervalo da reserva  $r'_{f'}$  é escolhido uniformemente no intervalo  $[|r'_{f'}|/2, T - |r'_{f'}|/2]$ .



**Figura 3. Uso de voids por rajadas do fluxo  $f'$ .**

, se  $|r_f| < |v_f|$ , onde  $v_f$  é o tamanho do void e supondo conhecidos os tamanhos de  $r_f$  e  $r'_{f'}$ .

Assim, uma aproximação da probabilidade de que uma rajada do fluxo  $f'$  seja acomodada no mesmo comprimento de onda do fluxo  $f$  pode ser dada por<sup>1</sup>:

$$G_b = \begin{cases} \frac{T - \mathbb{E}[B_f] - \mathbb{E}[B_{f'}]}{T - \mathbb{E}[B_f]} & , \text{ se } \mathbb{E}[B_f] + \mathbb{E}[B_{f'}] < T \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (7)$$

O cálculo da esperança do tamanho das rajadas,  $\mathbb{E}[B]$ , dos fluxos  $f$  e  $f'$ , considerando serem idênticos, é dada por:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[B] &= \sum_{k=0}^{+\infty} \mathbb{E} \left[ \sum_{i=1}^k \beta_i | N = k \right] \cdot \left( \frac{e^{-\lambda T} (\lambda T)^k}{k!} \right) = \\ &= \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{ka}{a+b} \cdot \left( \frac{e^{-\lambda T} (\lambda T)^k}{k!} \right) = \\ &= \frac{a}{a+b} \sum_{k=1}^{+\infty} \left( \frac{e^{-\lambda T} (\lambda T)^k}{(k-1)!} \right) = \\ &= \frac{(\lambda T)a}{a+b} \sum_{k=1}^{+\infty} \left( \frac{e^{-\lambda T} (\lambda T)^{(k-1)}}{(k-1)!} \right) \end{aligned}$$

como  $\sum_{k=1}^{+\infty} \left( \frac{e^{-\lambda T} (\lambda T)^{(k-1)}}{(k-1)!} \right) = 1$  tem-se que:

$$\mathbb{E}[B] = \frac{\lambda T a}{a+b} \quad (8)$$

<sup>1</sup>Os subíndices  $f$  e  $f'$  na expressão  $\mathbb{E}[B]$  foram usados nesta expressão para diferenciar o tamanho médio das rajadas de  $f$  e  $f'$ , respectivamente. Entretanto, quando não existir risco de dupla interpretação, será usado o termo  $\mathbb{E}[B]$  para representar o tamanho médio das rajadas

A Equação (9) sumariza o ganho em multiplexação estatística dos diversos paradigmas.

$$G_i = \begin{cases} 0 & , \text{ se } i = c; \\ \begin{cases} \frac{T - \mathbb{E}[B_f]\mathbb{E}[B'_f]}{T - \mathbb{E}[B_f]} & , \text{ se } \mathbb{E}[B_f] + \mathbb{E}[B'_f] < T \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases} & , \text{ se } i = b. \end{cases} \quad (9)$$

### 3.2.3. Cálculo do *overhead* de sinalização dos paradigmas OBS e OCS

O *overhead* de sinalização dos paradigmas é definido como a razão entre o tempo gasto para efetuar a reserva dos recursos em cada paradigma e o tempo total de uso da rede, contabilizado a partir do instante de envio do pacote de controle. Sejam  $t_s$  o tempo de sinalização e  $t_x$  o tempo de transmissão dos dados, o *overhead* de sinalização,  $C_i$ , é definido por:

$$C_i = \frac{t_s}{t_s + t_x} \quad (10)$$

Na rede OBS,  $t_s$  corresponde ao tempo gasto no processamento dos pacotes de controle em cada nó usando-se reserva unidirecional. Assim, assumindo-se uma rota com  $H$  nós, e que cada nó  $j$  da rota utilizada possui o mesmo tempo de processamento,  $p_j$ , tem-se que  $t_s = Hp_j$ . Adicionalmente, o tempo de transmissão é dado pela razão entre o tamanho da rajada e a velocidade de transmissão,  $t_x = \frac{B}{V}$ . Além disso, o *overhead* de sinalização do paradigma OBS, deve considerar para um dado fluxo, o número total de rajadas, expresso por  $\mathbb{E}[N_b]$ , necessário para o envio de todos os  $S$  bytes, o que é dado pela Equação (11).

$$\mathbb{E}[N_b] = \frac{S}{\mathbb{E}[B]}, \quad (11)$$

onde  $\mathbb{E}[B]$  é dado pela Equação (8). Assim, considerando o processo de reserva de recursos para todas as rajadas, tem-se que:

$$C_b = \mathbb{E}[N_b] \frac{VHp_j}{VHp_j + \mathbb{E}[B]}, \quad (12)$$

onde  $\mathbb{E}[B]$  é o tamanho médio que aproxima o tamanho da rajada  $B$  e  $V$  é a velocidade do enlace.

Considerando-se o paradigma OCS, tem-se que:

$$t_s = 2 \sum_{j=1}^H p_j = t_s = 2Hp_j,$$

se  $p_j$  é igual em todos os nós da rota.

Adicionalmente, para o cálculo de  $t_x$  é preciso estimar o tempo em que cada pacote utiliza o circuito, além da quantidade de pacotes IP necessária para transmitir o fluxo  $f$ . O tempo em que cada pacote utiliza o circuito corresponde ao tempo de resposta da fila M/G/1 e é dado por:

$$r = \frac{\mathbb{E}[S] + \rho\mathbb{E}[S](1 + C_v^2)}{2(1 - \rho)} \quad (13)$$

Já o número estimado de pacotes em cada fluxo, dados que o valor  $S$  pode ser obtido pela descrição do fluxo  $f$  e  $\mathbb{E}[X]$  pela Equação (3), é dado por:

$$\mathbb{E}[N_P] = \frac{S}{\mathbb{E}[X]}$$

Dessa forma, a estimativa de  $t_x$  é dada pela Equação (14).

$$t_x = \mathbb{E}[N_p]r \quad (14)$$

Assim:

$$C_c = \left( \frac{2Hp_i}{2Hp_i + \frac{S\mathbb{E}[S] + \rho\mathbb{E}[S](1+C_x^2)}{2(1-\rho)\mathbb{E}[X]}} \right) \quad (15)$$

Finalmente, observando-se as Equações (5) e (9), percebe-se que elas representam funções limitadas no domínio  $[0; 1]$ . Entretanto, a Equação (12) não representa uma função limitada em  $[0; 1]$  devido ao fator  $\mathbb{E}[N_b]$ , o que pode criar um viés na Equação (1), fazendo com que o custo de sinalização majore a função representada pela Equação (1). Portanto, para evitar tal viés, as Equações (12) e (15) são multiplicadas por  $\frac{1}{\mathbb{E}[N_b]}$ , produzindo a Equação (16) que sumariza o custo de sinalização dos diversos paradigmas:

$$C_i = \begin{cases} \frac{VHp_i}{VHp_i + \mathbb{E}[B]} & , \text{ se } i = b; \\ \left( \frac{2Hp_i}{2Hp_i + \frac{S\mathbb{E}[S] + \rho\mathbb{E}[S](1+C_x^2)}{2(1-\rho)\mathbb{E}[X]}} \right) \frac{1}{\mathbb{E}[N_b]} & , \text{ se } i = c. \end{cases} \quad (16)$$

De um modo geral, analisando a função 1, é possível perceber que os fluxos com alta taxa de transmissão e longa duração tendem a usar o paradigma OCS, isso porque, fluxos com alta taxa de transmissão produziram utilização equivalente à transmissão por rajadas e ainda teriam um menor custo de sinalização, já que no envio por OBS diversas rajadas seriam enviadas. Além disso, para fluxos intensos, o paradigma OBS tem baixo ganho em multiplexação estatística.

Por outro lado, fluxos com menor duração (menos bytes) e/ou baixa taxa de transmissão seriam usados pelo paradigma OBS, já que um número menor de rajadas seria enviado, diminuindo o custo de sinalização associado. Além disso, o paradigma produziria alta utilização, devido ao processo de montagem de rajadas e finalmente produziria alto ganho em multiplexação estatística, já que o tamanho dos *voids* seria maior, assim como o período de montagem.

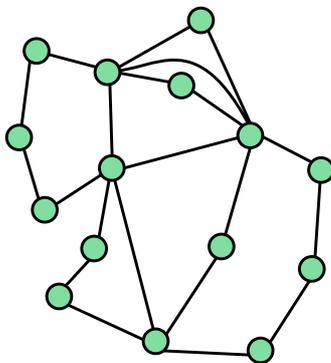
#### 4. Exemplos Numéricos

Para avaliar o impacto da função de decisão proposta, simulações foram realizadas utilizando simulador proprietário desenvolvido em C++. A Figura 4 mostra a topologia da rede utilizada nas simulações. No experimento, o tempo de reconfiguração da malha de comutação foi considerado insignificante em relação ao tempo de processamento dos pacotes de controle. Os parâmetros utilizados são sumarizados na Tabela 1.

Os fluxos foram gerados de acordo com um processo de Poisson produzindo fluxos de carga distribuída uniformemente entre valor mínimo e máximo (ver Tabela 1).

Comprimentos de onda por enlace	32
Duração da simulação	1 s
Intervalo médio de criação de fluxos	2.22 ms
Período de montagem de rajadas	1 ms
Tempo de processamento de pacote de controle	50 ms
Velocidade de enlace	1 Gbps
Tamanho máximo de rajada	500, 1085, 1670, 2255, 2840, 3425, 4010, 4596 KB
Tamanho mínimo de rajada	Tamanho máximo de rajada / 10
Tamanho mínimo de fluxo	1 KB
Tamanho máximo de fluxo	1 MB

**Tabela 1. Parâmetros utilizados nas simulações**



**Figura 4. Topologia utilizada nas simulações.**

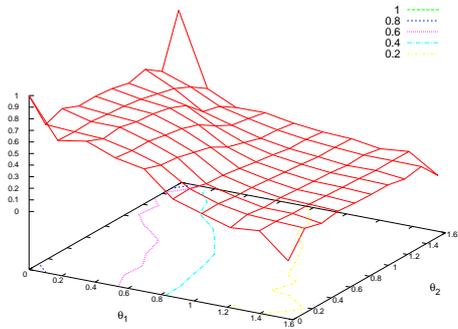
Os parâmetros da função de decisão (Função (1)),  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , foram dados em função de dois ângulos  $\theta_1$  e  $\theta_2$  que variam entre 15 pontos igualmente espaçados do intervalo  $[0, \pi/2]$ . Esta escolha foi feita pois os parâmetros conferem o mesmo comportamento quando multiplicados pelo mesmo fator. Assim:

$$\begin{aligned}\alpha &= \sin(\theta_1) \\ \beta &= \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) \\ \gamma &= \cos(\theta_1) \cos(\theta_2)\end{aligned}$$

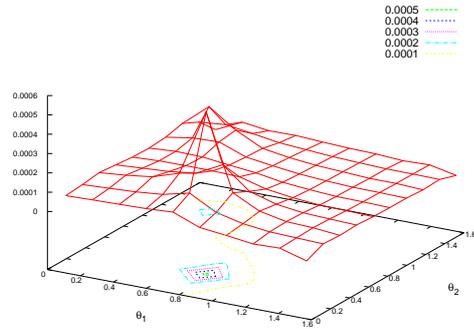
Foram feitas 10 replicações do experimento para cada uma das  $8 \times 15 \times 15 = 1800$  combinações dos parâmetros tamanho de rajadas,  $\theta_1$  e  $\theta_2$  e foram obtidas as seguintes métricas: Proporção de fluxos classificados como OCS; Taxa de bloqueio de fluxos OCS e de rajadas; Taxa de chegada média para pacotes de cada tipo de fluxo; Atraso médio de pacotes de fluxos OBS; Vazão média e Quantidade média de comprimentos de onda reservados em dado instante. A Figura 5 sumariza os resultados obtidos.

Conforme vê-se na Figura 5(a), de um modo geral, a proporção de fluxos classificados como OCS aumenta mais sensivelmente com a redução de  $\theta_1$  e mais suavemente com o aumento de  $\theta_2$ . Valores baixos de  $\theta_1$  e  $\theta_2$  correspondem a uma região em que a utilização e o ganho em multiplexação estatística possuem menos importância (menores valores de  $\alpha$  e  $\beta$ ) enquanto o custo de sinalização é mais importante. Isso explica uma proporção maior de fluxos transmitidos usando OCS e mostra como os parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  podem ser usados pelo operador da rede para beneficiar o critério mais apropriado. Além disso, para valores menores do que o tamanho mínimo de rajada (Figura 5(b)), uma chance de bloqueio menor parece estar associada com o maior peso no valor de utilização e multiplexação estatística.

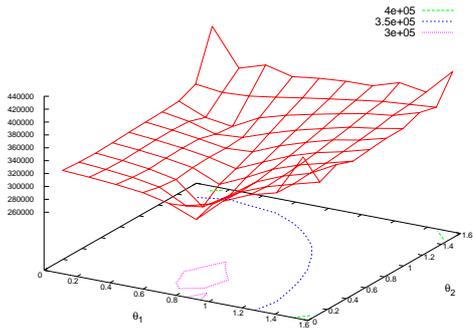
A taxa média de chegada de pacotes selecionados como OBS encontra valor mínimo justamente na vizinhança do ponto (0.8, 0.1) (Figura 5(c)), o que parece estar associado com a diminuição da taxa de bloqueio para tamanhos mínimo de rajada maio-



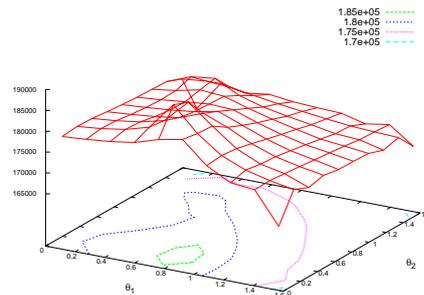
(a) Proporção de fluxos OCS.



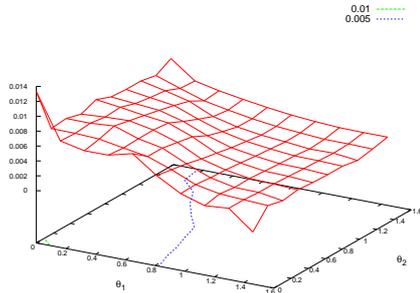
(b) Taxa de bloqueio de fluxos OBS.



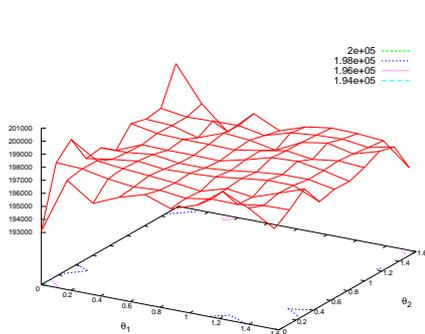
(c) Taxa média de chegada de pacotes para fluxos OBS.



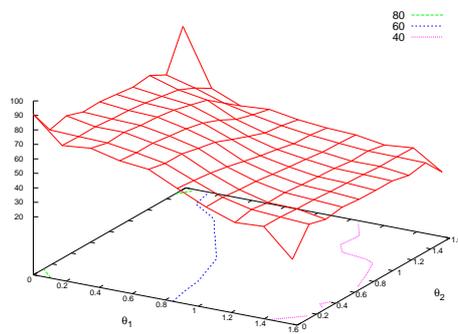
(d) Atraso médio de fluxos OBS (em microssegundos).



(e) Taxa de bloqueio de fluxos OCS.



(f) Vazão média em blocos de 1 ms.



(g) Quantidade média de comprimentos de onda reservados num dado instante.

**Figura 5. Medidas obtidas no experimento.**

res. Isto pode ser explicado pelos ganhos de multiplexação estatística obtidas no uso do OBS para fluxos esparsos. Note, no entanto, que quando o tamanho do rajada mínimo possui menor valor, a situação é inversa.

O atraso de fluxos OBS (Figura 5(d)) parece ser maior nas regiões onde há menor taxa para fluxos OBS. Isto se deve ao montador preencher o tamanho máximo de rajada com maior frequência, enviando-a antes de completar um período.

Para valores pequenos de rajada mínima, a taxa de bloqueio do OCS (Figura 5(e)) diminui com  $\theta_2$  e  $\theta_1$  (mais fortemente com este último). Para valores menores de rajada mínima (Figura 5(f)), a vazão foi máxima quando o ganho de multiplexação estatística foi o fator mais preponderante no algoritmo seletor e mínimo quando somente o custo de sinalização foi considerado, apresentando a média dos dois comportamentos em outras situações. O comportamento visto nas taxas de bloqueio se reflete no número médio de comprimentos de onda reservados em cada instante. Para valores menores de tamanho de rajada mínima (Figura 5(g)), há maior economia no uso de comprimentos de onda quando há maior predileção pelo OBS.

## 5. Conclusões e Trabalhos futuros

Dada a necessidade de um uso eficiente da grande largura de banda disponível na tecnologia WDM, esforços de pesquisa tem sido orientados na construção de uma arquitetura de comutação óptica híbrida que considera as vantagens dos paradigmas OBS e OCS. Dentre os paradigmas adotados, o que possui o menor custo é o paradigma integrado já que o mesmo conjunto de equipamentos pode ser utilizado para a transmissão em ambos os paradigmas.

Este artigo propôs uma função de decisão para a seleção do paradigma mais apropriado para a transmissão de um fluxo de dados em uma rede óptica híbrida integrada. A função determina o lucro potencial de cada paradigma, levando em consideração a utilização, o ganho em multiplexação estatística e o custo de sinalização de cada paradigma. Resultados obtidos via simulação mostram que os parâmetros da função podem ser usados pelo operador da rede para beneficiar o critério mais apropriado para a rede em questão.

Como trabalhos futuros, pretende-se a incorporação de critérios associados à probabilidade de perda de pacotes (mais alta na rede OBS) e/ou outros critérios de QoS. É possível ainda realizar refinamentos nas aproximações dadas na computação do ganho em multiplexação estatística

## Referências

- Barker, K., Benner, A., Hoare, R., Hoisie, A., Jones, A., Kerbyson, D., Li, D., Melhem, R., Rajamony, R., Schenfeld, E., Shao, S., Stunkel, C., and Walker, P. (2005). On the feasibility of optical circuit switching for high performance computing systems. In *Supercomputing, 2005. Proceedings of the ACM/IEEE SC 2005 Conference*, page 16.
- Buyse, J., De Leenheer, M., Develder, C., Dhoedt, B., and Demeester, P. (2009). Cost-effective burst-over-circuit-switching in a hybrid optical network. In *Networking and Services, 2009. ICNS '09. Fifth International Conference on*, pages 499 –504.

- Cao, X., Li, J., Chen, Y., and Qiao, C. (2002). Assembling tcp/ip packets in optical burst switched networks. In *IEEE GLOBECOM*, pages 2808–2812.
- Castro, E. R. S. (2011). *Modelo para distribuição de probabilidade do comprimento dos pacotes em redes de computadores*. PhD thesis, Universidade Federal de Campina Grande - Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica.
- Khodashenas, P., Perelló and, 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), 2011 15th International Conference on*, pages 1 –6.
- Menon, P., Cerroni, W., and Reimer, N. (2009). Overflow traffic modeling in hybrid optical circuit/burst switching nodes with service differentiation. In *Optical Fiber Communication - includes post deadline papers, 2009. OFC 2009. Conference on*, pages 1 –3.
- Moura, I., Mazullo, F., Maranhão, J., and Soares, A. (2011). Impacto da comutação obs na probabilidade de bloqueio ocs em redes híbridas ocs/obs. In *SBRC - Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, pages 698–711.
- Perelló and, 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 Optical Networks (ICTON), 2010 12th International Conference 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(1):69–84.
- Saha, S., Deogun, J., and Xu, L. (2012). Hyscaleii: A high performance hybrid optical network architecture for data centers. In *Sarnoff Symposium (SARNOFF), 2012 35th IEEE*, pages 1 –5.
- 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.
- Wang, Y., Wang, S., Xu, S., and Wu, X. (2009). A new hybrid optical network design consisting of lightpath and burst switching. In *Advanced Communication Technology, 2009. ICACT 2009. 11th International Conference on*, volume 03, pages 1873 –1876.
- Wong, E. and Zukerman, M. (2008). An optical hybrid switch with circuit queueing for burst clearing. *Lightwave Technology, Journal of*, 26(21):3509 –3527.
- Xue, F., Yoo, S., Yokoyama, H., and Horiuchi, Y. (2005). Performance comparison of optical burst and circuit switched networks. In *Optical Fiber Communication Conference, 2005. Technical Digest. OFC/NFOEC*, volume 3, page 3 pp. Vol. 3.