

Estudo das Arquiteturas de Conversão de Comprimento de Onda em Redes WDM com Comutação de Rajadas Ópticas

José Maranhão^{1*}, André Soares¹, William Giozza¹

¹NUPERC – Universidade Salvador – UNIFACS

R. Ponciano de Oliveira, 126, Rio Vermelho – 41950-275 Salvador - Bahia - Brazil

{jose.maranhao, andre.soares, giozza}@unifacs.br

Abstract. *Most studies about optical burst switched (OBS) networks has assumed that full wavelength conversion is available throughout the network. In an optical network with full wavelength conversion capability, all outputs at each node are equipped with wavelength converters, providing the best performance results. However, this full wavelength conversion capability requires a large amount of wavelength converters, which are expected to be quite expensive in the foreseeable future. Therefore, it is widely expected that any conversion capability in an optical network will be limited and only sparsely deployed. In this work, for the first time, the main architectures for wavelength conversion proposed for circuit switched networks are applied to OBS networks. These architectures works with a limited wavelength conversion capability. Also, we investigate the ratio between the cost benefit and gain factor related to full complete wavelength conversion. We propose a new methodology to define the number of wavelength converters to achieve the best cost-benefit relation, independent of the load traffic.*

Resumo. *A maioria dos estudos sobre redes ópticas com comutação de rajadas assume a conversão total de comprimentos de onda. Embora a conversão total de comprimento de onda alcance o melhor desempenho, a sua implementação exige uma grande quantidade de conversores de comprimentos de onda. Atualmente, isto representa um altíssimo custo devido às limitações tecnológicas desses dispositivos. Portanto, espera-se que a implementação de conversores em redes ópticas seja limitada. Neste trabalho é realizado um estudo pioneiro sobre o desempenho das arquiteturas de conversão de comprimento de onda que trabalham com número limitado de conversores, aplicadas às redes ópticas com comutação de rajadas. As métricas de desempenho avaliadas foram o fator de ganho relativo à conversão total e o custo-benefício da utilização de conversores. Este trabalho também propõe uma nova estratégia para a definição do número ideal de conversores que devem ser implementados em uma rede óptica, independente da carga de tráfego utilizada.*

1. Introdução

Através da tecnologia de multiplexação WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), diversos canais ópticos podem ser estabelecidos simultaneamente em uma fibra óptica, resultando em uma melhor utilização da sua enorme capacidade de transmissão

*Trabalho parcialmente suportado pela FAPESB e pelo CNPq.

[Murthy and Gurusamy, 2002]. Em uma rede óptica com tecnologia WDM, cada comprimento de onda pode ser modulado de forma independente, possibilitando diferentes taxas e formatos de transmissão. Em tais redes, existe uma diferença significativa entre a alta capacidade de transmissão das fibras ópticas e a limitada capacidade de comutação em domínio eletrônico, resultando em um gargalo no desempenho da rede por conta da comutação eletrônica. Diversas estratégias de comutação foram concebidas com o objetivo de viabilizar a transmissão de dados em redes ópticas WDM sem a necessidade da comutação eletrônica. Em uma rede óptica transparente, é possível transmitir um sinal óptico ao longo de nós intermediários sem a necessidade de conversão para o meio eletrônico. Desta forma é possível eliminar o custo associado à implementação de uma comutação de alta capacidade em meio eletrônico.

As alternativas existentes para o encaminhamento de informações em redes ópticas transparentes são: comutação de circuitos (*Optical Circuit Switching - OCS*), comutação de pacotes (*Optical Packet Switching - OPS*) e comutação de rajadas (*Optical Burst Switching - OBS*). As redes puramente ópticas que utilizam a comutação de circuitos tendem a ser ineficientes para tráfegos dinâmicos que não são previamente filtrados ou estaticamente multiplexados. Por outro lado, a comutação de pacotes ópticos ainda depende de avanços tecnológicos nas áreas de armazenamento e processamento de sinais ópticos. A comutação de rajadas ópticas (OBS) surge como uma alternativa intermediária [Qiao and Yoo, 1999], viável de implementação e, ao mesmo tempo, capaz de alocar os recursos da rede de forma mais eficiente do que as redes de comutação de circuito.

Para o estabelecimento de uma comunicação em uma rede OBS é necessário a escolha de uma rota e um comprimento de onda adequado para cada rajada óptica. Na ausência de conversores de comprimento de onda (*WC - Wavelength Converter*), a rajada óptica deverá ser transmitida ao longo de todos os enlaces da rota através do mesmo comprimento de onda. Esta propriedade é conhecida como continuidade obrigatória de comprimento de onda. Em uma rede óptica sem capacidade de conversão de comprimento de onda, um nó comutador consegue encaminhar uma rajada óptica de uma porta de entrada para uma porta de saída, se e somente se, o comprimento de onda do sinal óptico estiver disponível no enlace de saída. Caso contrário, a rajada é bloqueada.

Os conversores de comprimento de onda são dispositivos ópticos utilizados para converter o comprimento de onda de sinais ópticos transmitidos em uma rede. Um comutador óptico equipado com conversores de comprimento de onda é chamado de *WCR - Wavelength Convertible Router* [Assi et al., 2002]. A capacidade de conversão de um WCR é proporcional à quantidade de conversores de comprimento de onda do nó óptico. Um WC consegue converter apenas um comprimento de onda por vez. Portanto, a quantidade de conversões simultâneas possíveis é determinada pela quantidade de WCs no WCR.

A grande maioria dos trabalhos envolvendo redes ópticas com comutação de rajadas assume um cenário com conversão total [Teng and Rouskas, 2005], [Rosberg et al., 2003], [Dolzer et al., 2001]. Neste caso, todas as portas de saída dos comutadores têm um WC. Para implementar uma rede óptica com conversão total é necessária uma quantidade significativa de WCs. Devido a sua tecnologia pouco amadurecida, os WCs são elementos ópticos de custo elevado. Portanto, é altamente desejável que a capacidade de conversão de uma rede óptica seja implementada com um número reduzido de WCs (de forma limitada e esparsa). Arquiteturas para o posicionamento de WC/WCR foram propostas com o objetivo de alcançar desempenho

próximo ao da conversão total utilizando um número limitado de WCs [Lee and Li, 1993], [Soares et al., 2006]. Desta forma, as arquiteturas de conversão surgem como alternativas para alcançar uma melhor relação de custo-benefício na utilização dos conversores. Até então, as arquiteturas de conversão tinham sido aplicadas e estudadas somente nas redes OCS. Este artigo apresenta um estudo comparativo pioneiro das arquiteturas de conversão de comprimento de onda aplicadas em redes OBS.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: na Seção 2, são apresentados os trabalhos relacionados e destacadas as principais contribuições deste artigo. A Seção 3 descreve as arquiteturas de conversão de comprimento de onda empregadas nas redes WDM. Na Seção 4 são apresentadas as métricas de avaliação de desempenho utilizadas neste trabalho. A Seção 5 aborda o modelo de rede OBS adotado no trabalho. Em seguida, a Seção 6 descreve as simulações realizadas e os resultados obtidos. Por fim, a Seção 7 apresenta as principais conclusões deste trabalho.

2. Trabalhos Relacionados e Contribuições

A maioria dos estudos da tecnologia OBS realizados assumem a capacidade de conversão total da rede [Xiao and Leung, 1999], [Teng and Rouskas, 2005], [Rosberg et al., 2003], [Dolzer et al., 2001]. Entretanto, a implementação de uma rede óptica com conversão total exige uma grande quantidade de WCs. Atualmente, isto representa um altíssimo custo devido às limitações tecnológicas desses dispositivos.

Os autores em [Subramaniam et al., 1996] mostraram que para a tecnologia OCS é possível obter resultados de probabilidade de bloqueio próximos aos da rede com conversão total usando um número limitado de WCs. A partir do estudo pioneiro apresentado em [Subramaniam et al., 1996] o problema de identificar o número ideal de WCs e como posicioná-los para uma dada carga de tráfego submetida a uma dada topologia passou a ser estudado. Consequentemente, algumas estratégias e arquiteturas mais flexíveis vêm sendo propostas para redes OCS com o objetivo de atingir resultados próximos aos alcançados com a capacidade de conversão total, minimizando o número de conversores de WCs [Soares et al., 2006], [Chu et al., 2004]. Ainda para redes OCS, os autores em [Xi et al., 2005] apresentam uma metodologia para encontrar um número ideal de conversores independente da carga em função de um fator de ganho.

Segundo o nosso conhecimento, nenhum estudo avaliou o desempenho das arquiteturas de conversão de comprimento de onda mais flexíveis aplicadas às redes OBS. Portanto, com o objetivo de eliminar essa carência, neste artigo realizamos um estudo comparativo das principais arquiteturas de conversão de comprimento de onda em redes OBS. A relação de custo-benefício e o fator de ganho relativo à conversão total foram algumas das métricas utilizadas. Além disso, propomos também uma metodologia inédita para definir o número de WCs em função do custo-benefício, independente de carga de tráfego.

3. Arquiteturas de Conversão de Comprimento de Onda

Antes de entrar em detalhes a respeito das arquiteturas de conversão de comprimento de onda, é importante ressaltar que o impacto da utilização de WCs no desempenho das redes OBS é ainda mais significativo do que em redes OCS. Em redes OCS, a escolha do comprimento de onda adequado para o estabelecimento de um caminho óptico é feita segundo a disponibilidade dos comprimentos de onda em todos os enlaces da rota de

comunicação. Sendo assim, o algoritmo de alocação de comprimento de onda consegue priorizar a utilização de comprimentos de onda que estejam disponíveis em todos os enlaces da rota. Por outro lado, nas redes OBS, geralmente são utilizados protocolos de reserva de recursos sem confirmação, o que inviabiliza o conhecimento prévio dos recursos ao longo dos enlaces da rota de comunicação. Desta forma, o algoritmo de alocação de comprimento de onda tem acesso à disponibilidade dos comprimentos de onda apenas no primeiro enlace da rota. Em virtude desta limitação, o bom desempenho das redes OBS sofre uma maior dependência da capacidade de conversão de comprimento de onda em relação às redes OCS.

A capacidade de conversão de comprimento de onda pode ser definida para um WCR ou para uma rede como um todo. Um WCR pode ter capacidade de conversão de comprimento de onda completa, limitada ou nula. Em um WCR com capacidade completa de conversão é possível converter simultaneamente todos os comprimentos de onda das portas de entrada para qualquer outro comprimento de onda das portas de saída. Por outro lado, se o WCR é capaz de converter apenas um número limitado de comprimentos de onda ao mesmo tempo, ele é chamado de WCR com capacidade limitada de conversão. Considerando todos os nós, uma rede óptica pode implementar arquiteturas de distribuição de WC/WCR total, parcial, esparsa ou esparsa-parcial [Lee and Li, 1993].

Uma rede WDM com conversão total de comprimento de onda é formada por WCRs com capacidade completa de conversão (**FCWC - Full Complete Wavelength Conversion**). Neste caso, é possível garantir que uma rajada óptica somente será bloqueada se todos os comprimentos de onda de um dos enlaces da rota estiverem ocupados. Para o sucesso da transmissão da rajada, basta que haja apenas um comprimento disponível em cada um dos enlaces da rota. A Figura 1.a ilustra a implementação de uma arquitetura FCWC.

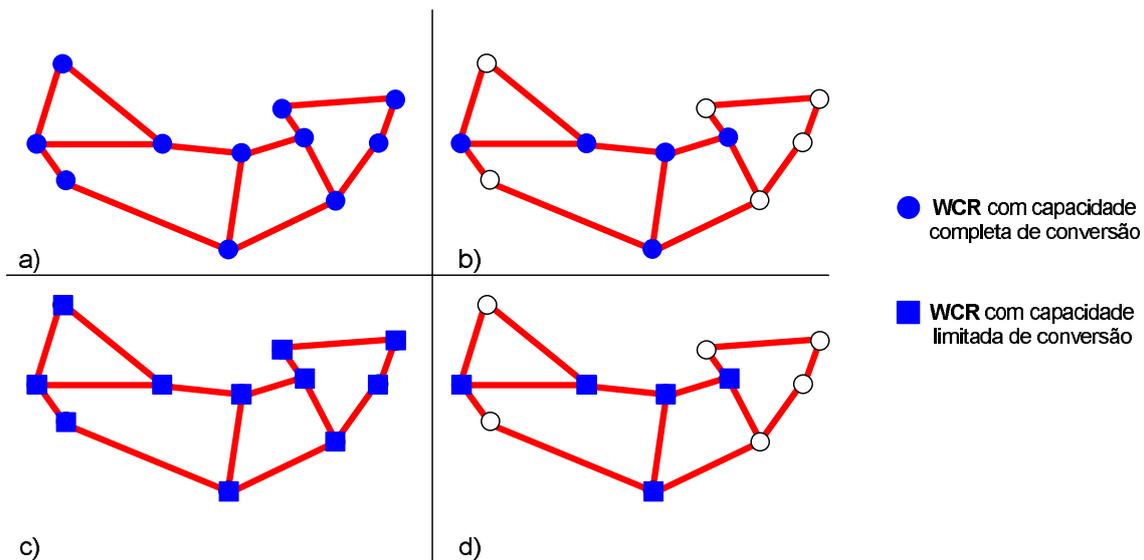


Figura 1: Arquiteturas de conversão de comprimento de onda.

Em uma rede com capacidade parcial de conversão de comprimento de onda (**PWC - Partial Wavelength Conversion**) todos os comutadores são WCRs com capacidade limitada de conversão (Figura 1.c). Quando apenas alguns comutadores da rede possuem capacidade completa de conversão, a rede possui capacidade esparsa de conversão (**SWC - Sparse Wavelength Conversion**). A Figura 1.b ilustra a implementação de uma arquitetura SWC. Se apenas alguns comutadores da rede possuem capacidade

limitada de conversão, a rede possui capacidade esparsa-parcial de conversão de comprimento de onda (**SPWC - *Sparse-Partial Wavelength Conversion***), como ilustrado na Figura 1d.

As arquiteturas de conversão mais flexíveis descritas anteriormente foram propostas com o objetivo de alcançar um desempenho próximo da arquitetura FCWC, utilizando um número reduzido de WCs. Todas as arquiteturas de conversão de comprimento de onda, com a exceção da FCWC, necessitam que WCs e/ou WCRs sejam posicionados nos nós da rede. Diferentes estratégias de posicionamento foram propostas para cada uma das arquiteturas [Arora and Subramaniam, 2000], [Chu et al., 2003], [Soares et al., 2006].

Para a arquitetura PWC, deve-se utilizar uma estratégia para definir o número de WCs que serão distribuídos uniformemente entre os nós comutadores da rede. Quanto maior o número de WCs, maior será o custo de implementação da rede. Portanto, a estratégia deve ser capaz de definir um número de WCs de forma a maximizar a relação de custo-benefício da utilização de conversão de comprimento de onda. Uma estratégia também deve ser utilizada para as arquiteturas SWC com o objetivo de definir quais comutadores da rede serão WCRs com capacidade completa de conversão. Para isto, a estratégia deve ser capaz de identificar um grupo de comutadores em potencial. Uma escolha errada poderá implicar em um alto investimento sem o retorno de desempenho esperado. **Neste trabalho foi aplicada a estratégia TOT (*Total Outgoing Traffic*) para distribuição de WCRs na arquitetura SWC [Arora and Subramaniam, 2000].**

Na arquitetura SPWC, uma estratégia deve ser utilizada para definir quais os comutadores da rede serão WCRs e quantos WCs existirão em cada um dos WCRs. Estudos realizados em redes OCS comprovaram que a arquitetura SPWC é a alternativa que alcança um desempenho mais próximo da arquitetura FCWC. **Neste trabalho, a estratégia FLP (*First Load Priority*) foi utilizada para distribuir os conversores na arquitetura SPWC [Soares et al., 2006].** Ainda em [Soares et al., 2006], foram comparadas diversas estratégias de conversão de comprimento de onda para as diversas arquiteturas (inclusive a SWC e a SPWC) para as redes OCS. Em tal estudo, foi observado que as estratégias TOT e FLP apresentaram os melhores resultados para as arquiteturas SWC e SPWC, respectivamente.

A grande maioria dos estudos a respeito do posicionamento de WCs em redes WDM assume aleatoriamente um número de WCs disponíveis ou de WCRs com capacidade completa de conversão para serem distribuídos. Em [Xi et al., 2005] o autor chama a atenção não só para a importância de como distribuir um número limitado de WC/WCR, mas também para o fato de definir a quantidade ideal de WC/WCR que devem ser distribuídos na rede. Ainda em [Xi et al., 2005], é proposta uma estratégia para definir quantos WCs devem ser utilizados e onde posicioná-los em uma rede OCS com arquitetura SPWC. Uma das conclusões desse trabalho foi que a partir de um determinada quantidade de WCs distribuídos, independente da carga de tráfego submetida à rede, os resultados da rede com SPWC eram praticamente idênticos aos resultados da rede com FCWC.

Neste artigo é proposta uma nova estratégia para a definição da quantidade de WC/WCR que deve ser distribuída em uma rede, independente da arquitetura de conversão. A estratégia visa descobrir qual a quantidade de WC/WCR que alcança a melhor relação de custo-benefício para a rede, independente da carga de tráfego empregada.

4. Métricas Avaliadas

4.1. Fator de Ganho Relativo à Conversão Total

A probabilidade de bloqueio de rajadas em redes OBS é influenciada pela carga submetida à rede e pela distribuição de WCs. Para uma determinada carga ρ , o limite inferior em termos de probabilidade de bloqueio ($Pb(WC_{M=\infty}, \rho)$) é alcançado com a implementação da arquitetura FCWC. Conseqüentemente, o pior desempenho é obtido quando a rede não possui capacidade de conversão ($Pb(WC_{M=0}, \rho)$). Para arquiteturas de conversão mais flexíveis, o desempenho é representado por ($Pb(WC_M, \rho)$), com a distribuição de um número limitado de WCs igual a M. O ganho de desempenho da arquitetura FCWC é definido por ($Pb(WC_{M=0}, \rho) - Pb(WC_{M=\infty}, \rho)$). Da mesma forma, o ganho de desempenho da rede com capacidade limitada de conversão de comprimento de onda é definido por ($Pb(WC_{M=0}, \rho) - Pb(WC_M, \rho)$). Assim, o cálculo do fator de ganho de desempenho relativo à arquitetura FCWC é obtido segundo a equação 1.

$$G_{Pb} = \frac{Pb(WC_{M=0}, \rho) - Pb(WC_M, \rho)}{Pb(WC_{M=0}, \rho) - Pb(WC_{M=\infty}, \rho)} \quad (1)$$

4.2. Relação Custo-Benefício

Neste trabalho consideramos que os WCs são agrupados em bancos de conversores localizados nos WCRs. Esta estrutura tem como objetivo o compartilhamento de WCs entre todas as portas de entrada do comutador. O banco de conversores pode ser utilizado para converter um sinal óptico de qualquer enlace de entrada para qualquer enlace de saída. Uma rajada somente será bloqueada pela ausência de conversores se todos os conversores do banco estiverem ocupados. No entanto, para a implementação de um WCR com compartilhamento de WCs é necessário utilizar uma segunda matriz de comutação para direcionar os sinais ópticos que foram convertidos no banco de conversores para o enlace de saída adequado. A Figura 2 ilustra a arquitetura de um WCR com um banco de WCs compartilhados. O custo e a complexidade da matriz de comutação principal do nó tende a ser significativamente superior em relação à matriz secundária.

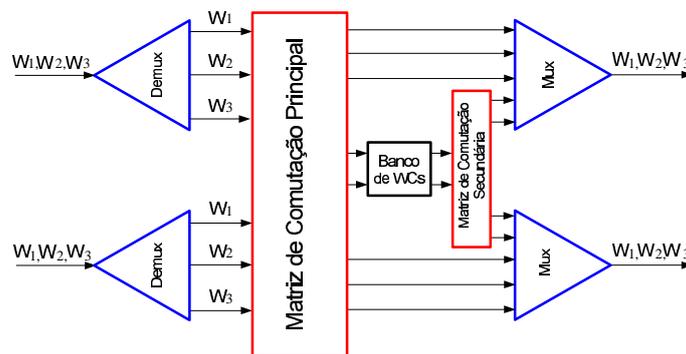


Figura 2: Arquitetura de um WCR com conversores compartilhados.

Para o cálculo do custo de um WCR com M WCs, assumimos as seguintes características:

1. ON_{custo} é o custo de um nó óptico sem capacidade de conversão e apenas com uma matriz de comutação.
2. O custo de uma matriz de comutação secundária é $SOS_{custo} = ON_{custo}/20$
3. O custo de um conversor é $WC_{custo} = SOS_{custo}$

4. O custo de um nó WCR é dado por $WCR_{custo}(i) = ON_{custo} + Num_{WC}(i) \cdot WC_{custo} + SOS_{custo}$
5. O custo de todos os nós da rede é dado por $NET_{custo} = Z \cdot ON_{custo} + \sum_{i=1}^Y WCR_{custo}(i)$, onde Z é o número de nós sem capacidade de conversão e Y é o número de nós com capacidade de conversão (WCR).

O ganho em relação ao custo de implementação de M WCs em uma rede é definido pela equação 2, onde $Custo(WC_{M=0})$ é o custo da rede sem conversores e $Custo(WC_M)$ é o custo da rede com M conversores distribuídos. Assumimos o custo da rede sem conversão de comprimento de onda como referência. À medida que são disponibilizados mais conversores à rede, o ganho cresce proporcionalmente segundo a razão entre custo da rede com M WCs e custo da rede sem conversão.

$$G_{Custo} = \frac{Custo(WC_M) - Custo(WC_{M=0})}{Custo(WC_{M=0})} \quad (2)$$

E finalmente, a relação custo-benefício pode ser calculada pela equação 3:

$$G_{CustoBeneficio} = \frac{G_{Pb}}{G_{Custo}} \quad (3)$$

A relação custo-benefício procura conciliar o ganho relativo à conversão total com o custo financeiro para alcançar tal ganho. Quanto maior o número de conversores disponibilizados para uma rede WDM, mais próximo da conversão total será o seu desempenho. Em contra partida, com o aumento do número de WCs, o custo dos equipamentos também cresce significativamente. Através desta métrica é possível dimensionar um número limitado de WCs para serem distribuídos na rede de forma a alcançar a melhor relação custo-benefício.

5. Modelo Utilizado para Rede OBS

Consideramos uma rede OBS com N comutadores ópticos que são interligados através de enlaces de fibra óptica. Cada enlace de fibra é capaz de suportar W comprimentos de onda utilizando a tecnologia WDM. Na topologia de rede OBS adotada, assumimos que todos os comutadores ópticos da rede podem operar como nó de borda ou nó de núcleo (Fig. 3).

Toda a vez que um nó da topologia participar de uma comunicação como nó origem ou destino, ele atuará como nó de borda. Quando o nó for intermediário de alguma comunicação, ele atuará como nó intermediário. Os nós de borda e os nós de núcleo cumprem funções distintas. Os nós de borda são responsáveis por recolher o tráfego de diferentes redes de acesso. Os dados coletados são agrupados em filas distintas de acordo com o endereço de destino. Um nó de borda deve ser responsável pela montagem de suas rajadas ópticas. Esta estratégia deve definir quando uma rajada óptica deverá ser gerada e/ou qual deverá ser o seu tamanho. Além de construir rajadas ópticas, o nó de borda é capaz de desmontar as rajadas ópticas. Os dados provenientes das rajadas desmontadas são enviados às redes de acesso. Os nós de borda também são responsáveis pela escolha do comprimento de onda e uma rota para o envio de cada rajada. Os nós de núcleo da rede OBS são responsáveis pelo encaminhamento de rajadas, pela leitura, pela interpretação e pelo repasse de mensagens de controle. Neste trabalho, o protocolo JIT (*Just In Time*) foi adotado para a reserva de recursos na rede OBS [Wei and McFarland, 2000].

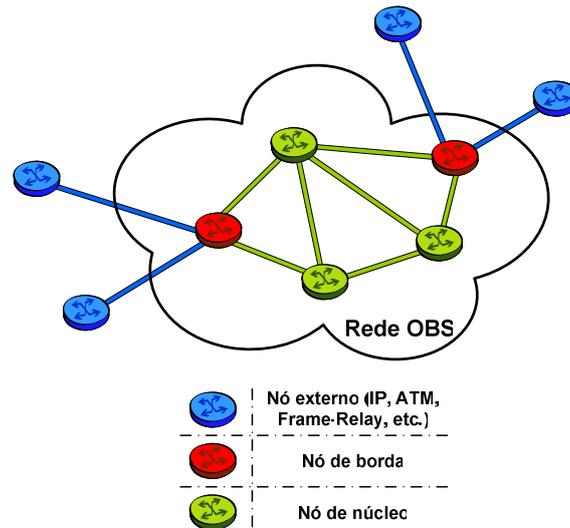


Figura 3: Arquitetura de rede OBS.

No processo de comunicação das redes OBS, antes de cada rajada óptica enviada, deverá ser enviada uma mensagem de controle. A função básica da mensagem de controle é reservar os recursos necessários para garantir que a rajada óptica seja encaminhada corretamente ao destino. Caso a mensagem de controle não consiga reservar os recursos necessários, a rajada óptica será bloqueada. O intervalo de tempo entre o envio da mensagem de controle e a rajada é denominado de *offset*. O nó de origem de uma comunicação, após o envio da mensagem de controle e a espera do tempo correspondente ao *offset*, enviará a rajada óptica sem a necessidade de confirmação se há recurso disponível até o destino ou se os comutadores já estão configurados e a sua espera.

Para este trabalho foi desenvolvida uma ferramenta de simulação (OB2S - *Optical Burst Switching Simulator*) capaz de avaliar o desempenho de redes OBS utilizando as diversas arquiteturas de conversão de comprimento de onda apresentadas anteriormente (Fig. 4).

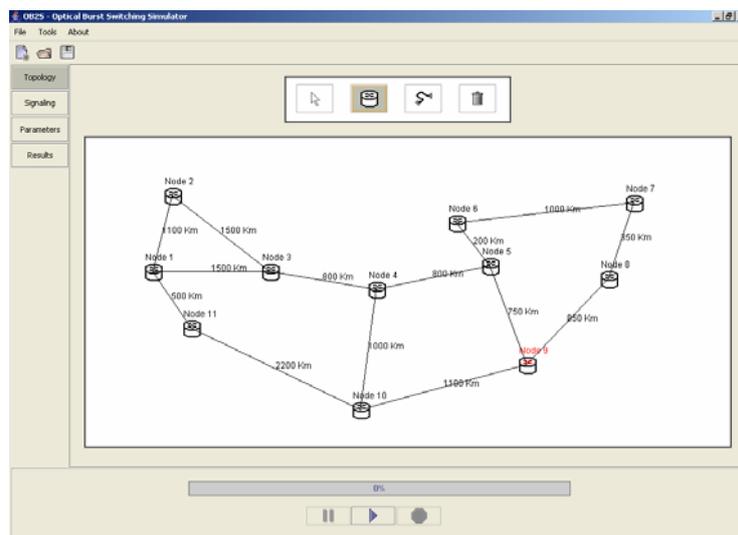


Figura 4: Ferramenta de simulação desenvolvida.

Com o objetivo de validar os resultados obtidos através da ferramenta de simulação, foram feitas comparações com resultados de modelos analíticos propostos

em [Teng and Rouskas, 2003]. Os modelos analíticos são apropriados para a arquitetura FCWC, com os protocolos de reserva de recursos *Just In Time* e *Just Enough Time* [Wei and McFarland, 2000], [Myungsik et al., 1997] e para uma topologia de rede limitada em três nós. A Figura 5 apresenta os resultados de simulação e os resultados do modelo analítico. Para ambos os protocolos de reserva de recursos em redes OBS, os resultados simulados foram muito próximos dos resultados analíticos.

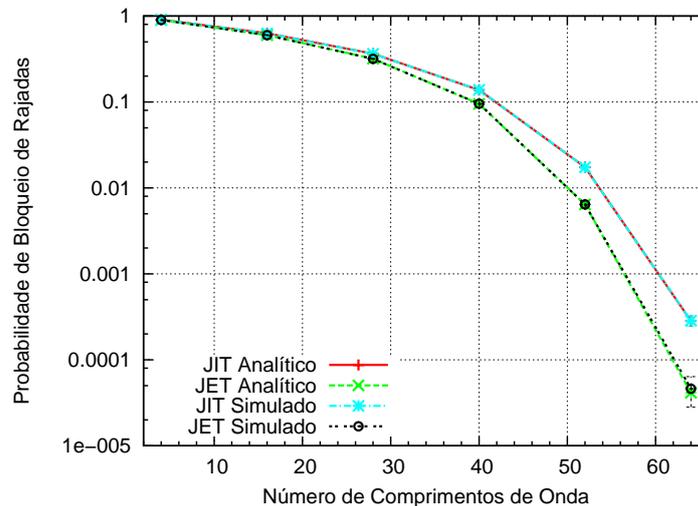


Figura 5: Validações da ferramenta de simulação.

O estudo de redes com comutação de rajadas ópticas é relativamente recente e os modelos analíticos existentes são bastante limitados. O modelo analítico utilizado para a validação dos resultados foi o mais abrangente dentre os encontrados na literatura. A validação não pôde ser realizada para outras topologias pela limitação do modelo analítico.

Um modelo de tráfego dinâmico foi assumido, onde as requisições de envio de rajadas são geradas de acordo com um processo Poissoniano com taxa média equivalente a λ . O tamanho médio das rajadas é distribuído exponencialmente com média equivalente a $1/\mu$. Sendo assim, a carga oferecida à rede é equivalente a λ/μ . Cada par de nós (origem, destino) da topologia de rede OBS possui a mesma probabilidade de gerar rajadas. O protocolo de roteamento utilizado assume o menor caminho e o algoritmo de alocação de comprimento de onda utilizado foi o *Random*.

O tempo gasto com o processamento de uma mensagem de controle foi definido em $12,5\mu\text{seg}$. O tempo gasto para a configuração da matriz de comutação foi definido em 10mseg . O atraso de propagação do sinal óptico foi definido em $5\mu\text{seg}/\text{Km}$. A razoabilidade destes valores é discutida em [Teng and Rouskas, 2005].

6. Resultados

Os resultados de simulação foram obtidos para a topologia Abilene (Fig. 6) com 40 comprimentos de onda disponíveis para cada enlace. Os resultados foram replicados 10 vezes, e em cada vez, foram geradas 200000 requisições de envio de rajada ópticas. Todos os resultados de simulação obtidos foram plotados com intervalos de confiança calculados com nível de confiança de 95%.

Esta seção apresenta um estudo sobre o desempenho de uma rede OBS operando sob diferentes arquiteturas de conversão de comprimento de onda. Primeiramente, um

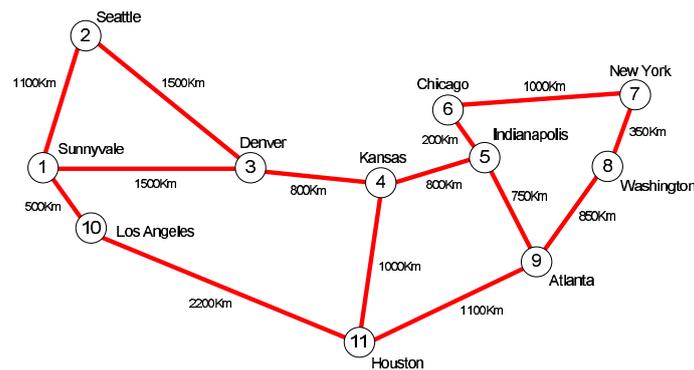


Figura 6: Topologia da rede Abilene.

estudo comparativo é realizado no intuito de descobrir qual o número total de WCs que cada arquitetura necessita para alcançar resultados semelhantes ao resultados da rede OBS com conversão total, independente da carga de tráfego utilizada. As curvas apresentadas nas Figuras 7.a, 7.c e 7.e apresentam no eixo x o número de comprimentos de onda e no eixo y o fator de ganho relativo à conversão total.

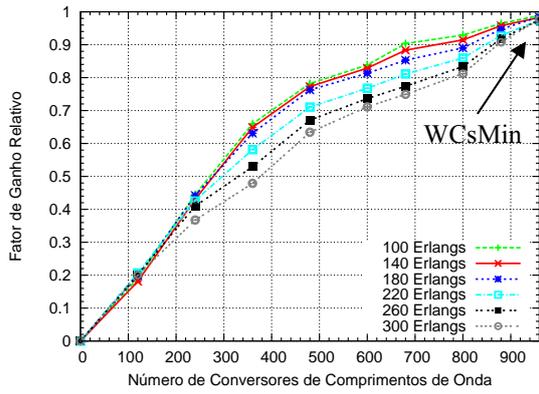
O fator de ganho igual a 0 indica que o desempenho da rede com número limitado de WCs é idêntico ao da rede sem conversão de comprimento de onda. Por outro lado, o fator de ganho igual a 1 significa que o desempenho da rede alcançou o mesmo desempenho da rede com conversão total. WCsMin representa o menor número de WCs necessários para alcançar os mesmos resultados da arquitetura FCWC (fator de ganho igual a 1), independente da carga de tráfego submetida à rede. Quanto menor o valor de WCsMin, menor será a despesa na compra de WCs para alcançar os mesmos resultados da conversão total.

Os valores de WCsMin para as arquiteturas SWC, PWC e SPWC foram 960, 693 e 380, respectivamente. Estes valores representam uma redução de 14,3%, 38,1% e 66% do número de WCs necessários para a implementação da arquitetura FCWC (1120 WCs). Os resultados mostraram que a conversão esparsa-parcial foi a melhor alternativa para alcançar o mesmo desempenho da rede OBS com conversão total utilizando o menor número de WCs (redução de 66% WCs em relação à rede com conversão total).

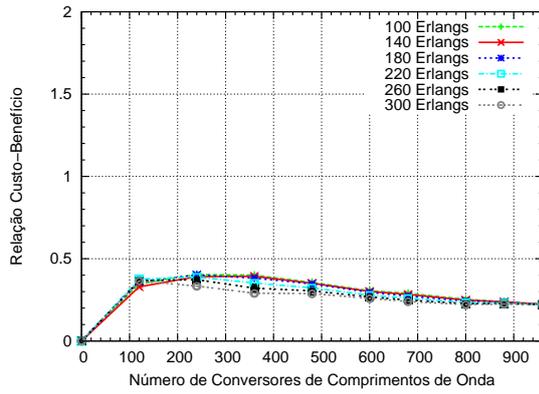
As curvas das Figuras 7.a, 7.c e 7.e indicam que na medida em que WCs são disponibilizados à rede OBS, o desempenho tende a melhorar. No entanto, este próximo estudo procura avaliar a relação entre o custo dos WCs utilizados e o ganho de desempenho para cada uma das arquiteturas de conversão.

As curvas apresentadas nas Figuras 7.b, 7.d e 7.f apresentam no eixo x o número de comprimentos de onda e no eixo y a relação custo-benefício. De forma simplificada, a relação custo-benefício tende a ser crescente quando a taxa de aumento de custo de conversores for superada pela taxa de aumento de desempenho da rede em termos de probabilidade de bloqueio. Do contrário, a relação tende a ser decrescente.

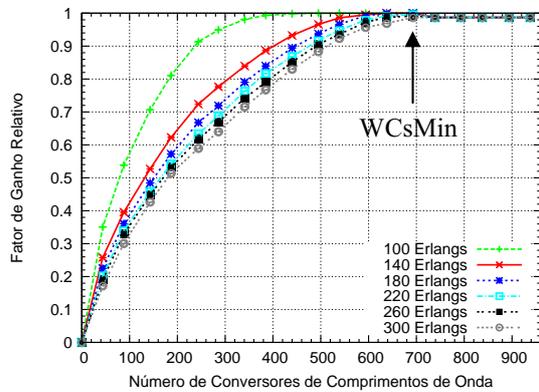
As melhores relações de custo-benefício foram alcançadas com 240 WCs (Fig. 7.b), 44 WCs (Fig. 7.d) e 100 WCs (Fig. 7.f). Os resultados também mostraram que, independente da carga de tráfego utilizada, os valores ótimos de custo-benefício são alcançados com praticamente o mesmo número de WCs.



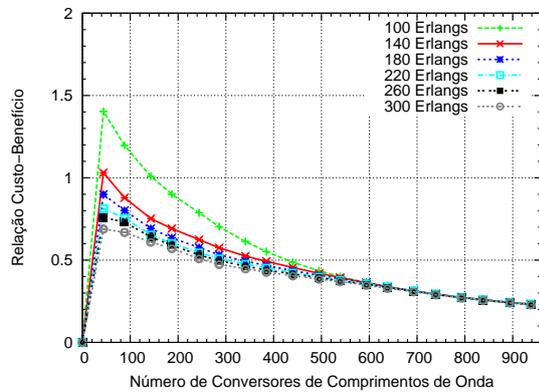
a)



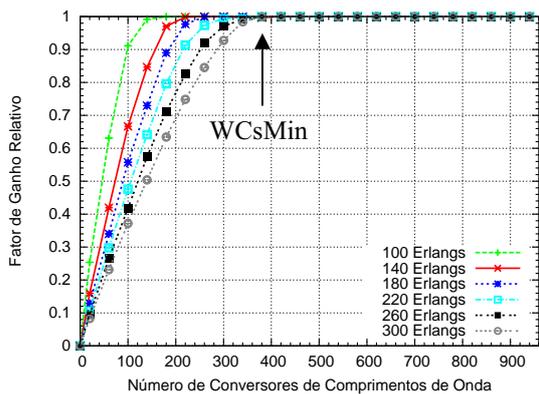
b)



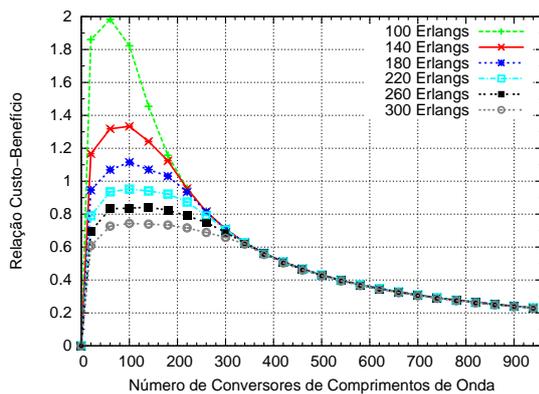
c)



d)



e)



f)

Figura 7: a) Fator de ganho com arquitetura SWC. b) Custo-benefício com arquitetura SWC. c) Fator de ganho com arquitetura PWC. d) Custo-benefício com arquitetura PWC. e) Fator de ganho com arquitetura SPWC. f) Custo-benefício com arquitetura SPWC.

É importante notar que o número ideal de WCs em termos de custo-benefício não foi necessariamente equivalente ao número de WCs necessários para alcançar o mesmo desempenho da rede com arquitetura FCWC. Segundo o nosso conhecimento, essa característica ainda não havia sido discutida na literatura. Esta observação foi motivante para propormos uma nova estratégia para dimensionar o número de WCs em uma rede óptica WDM de acordo com os valores ótimos da relação custo-benefício. A Figura 8 apresenta o desempenho em termos de probabilidade de bloqueio para a rede OBS operando com todas as arquiteturas de conversão estudadas e sem conversão. Para cada arquitetura de conversão, foram disponibilizados WCs de acordo com a estratégia proposta para o dimensionamento de WCs. Ou seja, o dimensionamento de WCs foi de acordo com os limites ótimos da relação custo-benefício encontrados nas curvas 7.b, 7.d e 7.f.

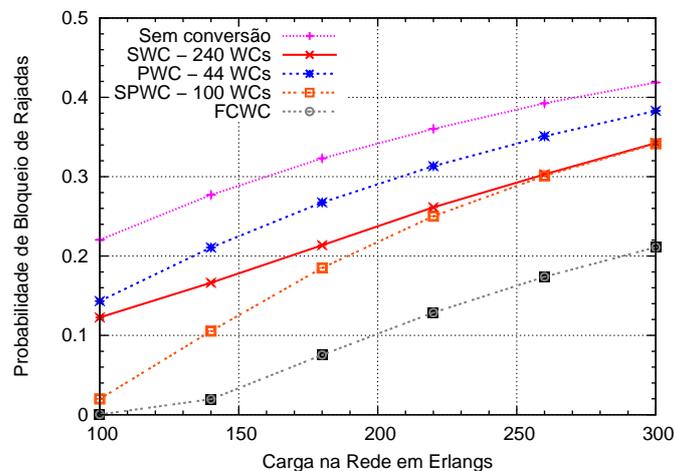


Figura 8: Comparativo de desempenho das arquiteturas de conversão de comprimento de onda.

Comparando o desempenho das arquiteturas de conversão em termos de probabilidade de bloqueio, a SPWC obteve o melhor resultado. A partir da carga de tráfego de 250 Erlangs, o desempenho das arquiteturas SWC e SPWC foi similar.

A rede OBS com o dimensionamento de WCs baseado no melhor custo-benefício, obteve desempenho superior ao cenário sem conversão, porém não alcançou o mesmo desempenho da conversão total. Diversos estudos propõem estratégias para alcançar o desempenho similar ao da conversão total em um cenário com conversão limitada. No entanto, não levam em conta o investimento financeiro necessário para alcançar este patamar de desempenho.

7. Conclusões

Este trabalho apresentou um estudo pioneiro sobre o desempenho das arquiteturas de conversão de comprimento de onda que trabalham com número limitado de conversores, aplicadas às redes ópticas com comutação de rajadas.

Os resultados comprovaram que as arquiteturas de conversão aplicadas às redes OBS possibilitam uma grande economia de WCs em relação à conversão total, sem comprometer o desempenho da rede. O estudo também apresentou uma análise do custo-benefício da utilização de WCs na rede. Os resultados comprovaram que, em termos de custo-benefício, o número de WCs não deve ser dimensionado de forma a alcançar os mesmos resultados da conversão total. Este artigo propôs uma nova estratégia para a

definição do número de WCs necessários em uma rede óptica com comutação de rajadas de forma a alcançar a melhor relação entre o custo destes equipamentos e ganho de desempenho em termos de probabilidade de bloqueio.

Referências

- Arora, A. S. and Subramaniam, S. (2000). Converter placement in wavelength routing mesh topologies. In *IEEE ICC 2000*, pages 1282–1288.
- Assi, C. M., Shami, A. A., Ali, M. A., Zhang, Z., and Liu, X. (2002). Impact of wavelength converters on the performance of optical networks. *SPIE/Kluwer Optical Networks Magazine*, 3(2):22 – 30.
- Chu, X., Li, B., and Chlamtac, I. (2003). Wavelength converter placement under different rwa algorithms in wavelength-routed all-optical networks. *IEEE Transactions on Communications*, pages 607 – 617.
- Chu, X., Liu, J., and Zhang, Z. (2004). Analysis of sparse-partial wavelength conversion in wavelength-routed WDM networks. *IEEE INFOCOM*.
- Dolzer, K., Gauger, C., Späth, J., and Bodamer, S. (2001). Evaluation of reservation mechanisms for optical burst switching. *International Journal of Electronics and Communications*, 55(1).
- Lee, K.-C. and Li, V. . K. (1993). A wavelength-convertible network. *Journal of Lightwave Technology*, 11(5/6):962–970.
- Murthy, C. S. R. and Gurusamy, M. (2002). *WDM Optical Networks - Concepts, Design and Algorithms*. Prentice Hall PTR.
- Myungsik, Y., Myoungki, J., and Chunming, Q. (1997). A high speed protocol for bursty traffic in optical networks. *Proceedings of the 3rd SPIE Conference on All-Optical Communication Systems*, pages 79–90.
- 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.
- Rosberg, Z., Le, H., Zukerman, M., and White, J. (2003). Performance analysis of optical burst-switching networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 21(7).
- Soares, A., Maranhão, J., Giozza, W., and Cunha, P. (2006). Wavelength converter placement scheme for optical network with sparse-partial wavelength conversion capability. *13th International Conference on Telecommunications*.
- Subramaniam, S., Azizoglu, M., and Somani, A. (1996). All-optical networks with sparse wavelength conversion. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, pages 544 – 557.
- Teng, J. and Rouskas, G. N. (2003). A comparison of the JIT, JET, and horizon wavelength reservation schemes on a single OBS node. In *Proceedings of the First International Workshop on Optical Burst Switching*.
- Teng, J. and Rouskas, G. N. (2005). A detailed analysis and performance comparison of wavelength reservation schemes for optical burst switched networks. *Photonic Network Communication*, 9(3):311–335.
- Wei, J. Y. and McFarland, R. I. (2000). Just-in-time signaling for wdm optical burst. *Journal of Lightwave Technology*, 18(12).

Xi, K., Arakawa, S., and Murata, M. (2005). How many wavelength converters do we need? *Optical Network Design and Modeling, 2005.*, pages 347–358.

Xiao, G. and Leung, Y.-W. (1999). Algorithms for allocating wavelength converters in all-optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 7:545–557.