

Estudo Comparativo de Arquiteturas de ROADMs para Redes Ópticas de Próxima Geração

Marcelo Ribeiro Nascimento, Eduardo Cavalcanti Magalhães e Vinícius Garcia de Oliveira

Resumo— Os ROADMs são elementos chave para tornar as redes ópticas dinâmicas e flexíveis. A reconfigurabilidade remota do roteamento de comprimentos de onda acarreta na redução dos custos operacionais, melhor utilização dos recursos, maior agilidade e flexibilidade na criação de serviços e simplificação dos algoritmos de roteamento. Entretanto, a geração atual de ROADMs, baseada nas tecnologias PLC e WSS, ainda apresenta limitações que restringem a flexibilidade das redes ópticas, em especial restrições de direção, comprimento de onda e contenção. Este artigo apresenta um estudo comparativo de propostas para ROADMs de próxima geração em termos de custo para diferentes cenários.

Palavras-Chave— Redes Ópticas de Próxima Geração, ROADM, WSS, OXC, MCS.

Abstract— The ROADMs are key components to increase the dynamicity and flexibility of optical networks. In its first generation, solely based on PLC and WSS technology, ROADMs allowed service providers to automate some of its network operations, reducing the OPEX cost and improving the quality of service offered to the customer. However, the current solution is limited to several constraints as direction, color and contention, and still demands truck rolls and manual reconfiguration depending on the desired operation. This paper compares new proposals for the next generation ROADMs in terms of cost in different scenarios.

Keywords— Next Generation ROADM, WSS, OXC, MCS.

I. INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda de tráfego impulsionado pela disseminação da Internet tem exigido taxas de transmissão de dados cada vez mais rápidas. O uso de aplicações com perfil de alto consumo de largura de banda, envolvendo principalmente vídeos e imagens de alta qualidade, tem crescido rapidamente devido ao sucesso dos *tablets* e *smartphones*.

Com o intuito de atender a esse cenário de altas taxas e de agilidade no provisionamento de serviços, os sistemas ópticos vêm sofrendo avanços significativos com relação às tecnologias de transmissão e, mais recentemente, de comutação. A comutação na camada óptica traz inúmeros benefícios ao evitar que o tráfego seja tratado no domínio eletrônico [1], como SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) ou OTN (*Optical Transport Network*).

O *Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer* (ROADM) é o elemento de rede responsável por permitir a configuração remota e automatizada dos caminhos de luz na rede por meio do roteamento de comprimentos de onda. A primeira geração

ganhou força com o ROADM-PLC (*Planar Lightwave Circuit*), que limita-se a apenas duas portas de rede (ou dois graus). Posteriormente a tecnologia *Wavelength Selective Switch* (WSS) trouxe grande avanço para as redes ópticas, viabilizando sistemas de múltiplos graus. Essa evolução possibilitou a construção de redes ópticas dinâmicas com topologia em malha utilizando o ROADM-WSS para interconectar anéis ópticos baseados em ROADM-PLC.

Entretanto, existem limitações de configuração na arquitetura atual do ROADM-WSS que implicam em intervenção manual do operador, o que reduz a agilidade da rede e acarreta em impactos para o OPEX (*Operational Expenditure*). Hoje, a adição e a remoção de canais na rede se limitam tanto ao comprimento de onda quanto à direção do grau local.

Com o objetivo de adicionar maior flexibilidade às redes ópticas e reduzir o OPEX, características de independência de comprimento de onda (*Colorless*) e direção (*Directionless*) sem a adição de contenção (*Contentionless*) tornam-se requisitos para a arquitetura de próxima geração denominada ROADM-CDC. Ainda neste contexto de evolução, há uma nova funcionalidade relacionada à utilização espectral dos canais, que denomina-se *gridless* ou *flexgrid*. Essa flexibilidade permite que o operador da rede configure a largura espectral reservada aos canais, o que torna apto a operar com os novos formatos propostos para transmissões acima de 100Gbit/s.

Assim, mesmo com toda evolução alcançada durante os últimos anos, ainda há desafios a serem estudados e superados para atingir o uso mais eficiente e pleno dos recursos disponíveis nas redes. Neste sentido, novos componentes estão surgindo, dentre os quais destacam-se o *Multicast Switching* (MCS) e o *Optical Cross Connect* (OXC) M:M.

A partir dos novos componentes, propostas de arquiteturas para próxima geração de ROADMs são apresentadas e discutidas nesse artigo. O foco é explorar as possíveis soluções de ROADM-CDC através de uma análise de custo e de funcionalidades, considerando componentes e tecnologias já disponíveis no mercado. Como resultado, pretendemos caracterizar as arquiteturas para diferentes perfis de rede através da variação do número de graus e da porcentagem de *add-drop*.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II descreve os requisitos para as redes ópticas de próxima geração; a Seção III apresenta as propostas de arquiteturas que serão analisadas; a Seção IV detalha a análise e os resultados e a Seção V traz as conclusões do trabalho.

II. REQUISITOS DAS REDES WDM DE PRÓXIMA GERAÇÃO

A próxima geração de ROADMs é concebida a partir de um conjunto de novas funcionalidades, cujo objetivo é

tornar as redes ópticas mais flexíveis e dinâmicas [1] [2]. Nesta direção, foram pensadas características que trouxessem maior flexibilidade no roteamento de comprimentos de onda e que pudessem ser configuradas de forma remota, sem a necessidade da intervenção manual de um técnico em campo. As funcionalidades são:

- **Colorless**: independência de comprimento de onda;
- **Directionless**: independência de direção;
- **Contentionless**: livre de bloqueio de canais;
- **Gridless ou FlexGrid**: grade espectral flexível.

Uma arquitetura que implemente as três primeiras características é definida como ROADM-CDC. Abaixo estão descritas cada uma das funcionalidades que entram como requisito para os elementos de comutação óptica de próxima geração.

A. Colorless

Uma grande limitação da geração atual de ROADMs está na atribuição fixa de comprimentos de onda para as portas de *add-drop* devido ao uso de MUX/DEMUX AWG (*Arrayed Waveguide Grating*) na estrutura de *add-drop*. Atualmente o uso de laser sintonizável é a opção preferencial adotada pelas operadoras de telecomunicações em função da otimização do estoque de sobressalentes. Entretanto, este apenas pode operar em um comprimento de onda específico quando atribuído à uma porta de *add-drop* uma vez que esta permite a inclusão e remoção do λ definido à esta. Portanto, no caso deste comprimento de onda não estar disponível ao longo do caminho solicitado pelo usuário é necessário realizar uma troca manual para outra porta de *add-drop* cujo λ esteja disponível, o que requer a presença de um técnico de campo. Caso não exista essa limitação é possível, através de configuração remota, sintonizar o laser para outro comprimento de onda que esteja disponível para o caminho desejado sem a necessidade de operações locais.

B. Directionless

Na arquitetura atual do ROADM, a inserção/remoção de comprimentos de onda é realizada diretamente no grau de linha. Portanto, um canal específico pode ser inserido ou removido apenas neste grau. Dada esta limitação, esta porta de *add-drop* recebe a nomenclatura de porta local.

Para superar essa limitação é necessário o uso de porta de *add-drop* global, que permite a inserção/remoção de e para qualquer grau do nó. Assim, torna-se possível encaminhar o sinal do cliente para qualquer direção da rede sem a necessidade de realizar a troca manual de porta de *add-drop*.

C. Contentionless

Uma forma de eliminar a restrição de direção descrita acima é com o uso de uma chave WSS antes da estrutura de *add-drop* do nó. Desta forma, após a realização da inserção do sinal do cliente este pode ser direcionado para qualquer grau. A mesma lógica é aplicada à remoção do sinal. Essa solução elimina a restrição de direção, porém adiciona uma nova restrição - a contenção de comprimento de onda. Como a derivação e inserção passam por uma mesma chave WSS,

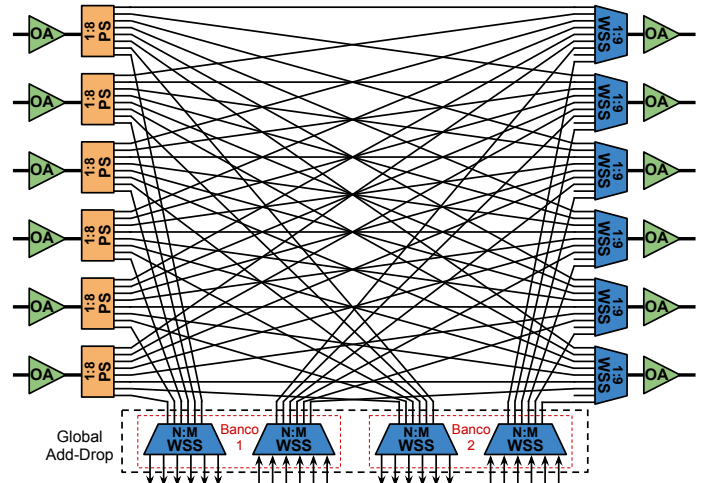


Fig. 1. Arquitetura ROADM-CDC usando NxM WSS.

não é possível realizar operações de *add-drop* simultânea dos mesmos comprimentos de onda provenientes de graus diferentes.

Atualmente essa restrição é contornada com o uso tanto de portas de *add-drop* global quanto local, porém esta abordagem é bastante limitada. Outras propostas [3] [4] sugerem o uso de mais de uma chave WSS para as operações de *add-drop*, criando bancos estruturais independentes de forma a diminuir a probabilidade de contenção. Essa questão é retomada em maiores detalhes na seção III-D.

D. Gridless

Outra preocupação relacionada aos ROADMs de próxima geração está na evolução das tecnologias de transmissão. Até a transmissão em 100Gbit/s ainda é possível utilizar canais com grade de 50GHz. No entanto, para taxas superiores será necessário o uso de espaçamentos maiores. Neste sentido, um ROADM com grade fixa estaria limitado às taxas de transmissão atuais.

A proposta do *gridless* é possibilitar a configuração da grade dos canais de forma dinâmica, com o objetivo de adaptar-se tanto ao cenários de taxas superiores a 100Gbit/s, como também trabalhar com canais de grade variável para melhor aproveitamento do espectro.

Chaves WSS baseadas em tecnologia de LCoS (*Liquid Cristal on Silicon*) já disponível no mercado apresentam uma solução consistente para essa limitação. Desta forma, o desafio no uso de grade flexível se aplica mais ao controle das redes que se valham deste recurso [5] do que na comutação propriamente dita. Desta forma, esta questão não demanda maior atenção dentro do escopo do trabalho atual.

Como visto, os requisitos para as redes ópticas de próxima geração demandam por novas funcionalidades que a atual arquitetura de nó não é capaz de atender. A próxima seção apresenta as principais propostas de arquitetura de ROADMs de próxima geração capazes de suprir essas demandas.

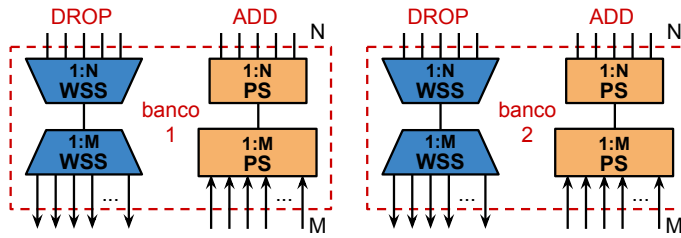


Fig. 2. Módulo Add-Drop Global com WSS de muitas portas (ex. 1:20).

III. ARQUITETURAS DE ROADM

Como visto, a tecnologia WSS foi a grande protagonista da atual geração de ROADMs, pois foi a responsável por viabilizar a criação de sistemas de múltiplos graus em um cenário, que até então, era dominado por ROADMs-PLC de apenas dois graus com topologia em anel. Porém, com o advento do ROADM-WSS tornou-se possível inter-conectar os anéis e formar redes em malha.

No entanto, a geração atual de ROADM-WSS é dependente de comprimento de onda e direção, pois a arquitetura baseia-se apenas em *add-drop* locais com MUX/DEMUX para separação dos canais. Contudo, tornar essa arquitetura independente de direção e comprimento de onda seria uma tarefa simples considerando módulos N:M WSS [6]. Bastaria substituir os *add-drop* locais por um global e utilizar os módulos N:M WSS na separação dos canais, como ilustrado na Figura 1.

Embora essa arquitetura mostra-se capaz de resolver as limitações de direção, comprimento de onda e contenção, ainda não existe uma tecnologia que possibilite ou viabilize a criação de um módulo N:M WSS [7]. Portanto, os fabricantes estão investindo em componentes alternativos que permitam atingir parcialmente as funcionalidades de um N:M WSS.

Neste sentido, algumas propostas de arquiteturas para próxima geração de ROADMs são apresentadas e discutidas nas subseções seguintes com o foco de explorar economicamente as possibilidades a partir de componentes/tecnologias disponíveis hoje no mercado.

A. ROADM-CD: High-port-count

Uma das arquiteturas apresentadas em [6] utiliza no *add-drop* global módulos WSS contrapostos, como pode ser visto na Figura 2. Um dos WSS é responsável por agregar os sinais provenientes dos graus e selecionar os canais que serão removidos do nó. Na sequência, outro WSS atua na separação dos canais para o *drop*. No *add* o processo é similar, diferenciando-se pelo uso de *power splitters* no lugar dos WSSs. Eles agregam os canais de entrada e enviam uma cópia para cada um dos graus de linha.

Uma questão pertinente ao número de canais suportados pelo módulo de *add-drop* está diretamente relacionada ao número de portas do WSS. Portanto, quanto maior o número de portas do WSS (*High Port Count*), maior será a quantidade de canais de *add-drop* e menor a necessidade de criar estruturas paralelas (bancos). Contudo, a arquitetura não elimina bloqueio intra-node, que pode ocorrer na ligação entre os

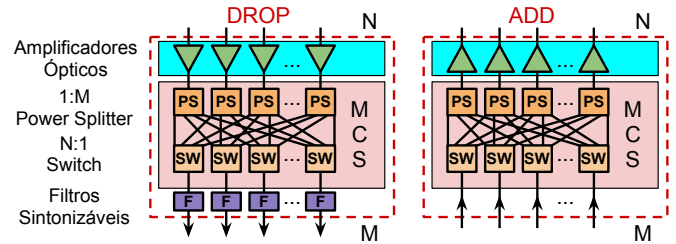


Fig. 3. Módulo Add-Drop Global com Multicast Switch.

WSSs no *drop* e entre o WSS e *splitter* no *add*. Em um cenário com dois ou mais bancos de *add-drop*, o plano de controle pode atuar para mitigar a contenção, como apresentado em [4].

B. ROADM-CDC: Multicast Switching

Outra forma de construir um *add-drop* independente de comprimento de onda e direção é através do componente óptico TPA (*Transponder Aggregator*) proposto em [8]. Essa técnica, cuja arquitetura está representada na Figura 3, baseia-se em *splitters* e *switches* de fibra para implementar a funcionalidade de *multicast switching*.

Nessa abordagem, uma cópia do sinal de entrada de cada grau é direcionado ao MCS do módulo de *drop*, que pode replicá-lo para qualquer porta de saída. Portanto o sinal de saída do *drop* será uma cópia do sinal de linha (WDM). É necessário o uso de um filtro sintonizável para selecionar o canal que se deseja remover, tornando independente de comprimento de onda. Entretanto, com o uso de detecção coerente o uso desse filtro torna-se desnecessário. Outra questão referente ao MCS é a perda de potência devido à aplicação de *power splitters*, o que demanda o uso de um *array* de pré-amplificadores.

De forma similar, o módulo de *add* recebe os canais a serem inseridos no sistema e ao entrar no MCS são direcionados às portas de saída específicas (graus). Como o sinal de entrada representa apenas um canal, não necessita de filtros.

De acordo com [9], a configuração mais adequada atualmente de *multicast switch* para um ROADM-CDC é 8:16 e o *add-drop* pode escalar através do uso de múltiplos MCS interligados por módulos WSS.

C. ROADM-CDC: OXC

A referência [10] apresenta uma proposta de arquitetura ROADM-CDC utilizando OXC (*Optical Cross-Connect*) de 192:192 portas no *add-drop*. A Figura 4 apresenta uma generalização desta proposta.

Neste caso temos a mesma estrutura de componentes tanto para o *add* quanto para o *drop*. Neste último, os demultiplexadores são responsáveis por separar os canais do sinal de entrada dos graus e enviá-los ao OXC. Cada OXC comporta até dois AWGs, para uma rede de 96 canais, portanto o *drop* do sistema ROADM é composto por um AWG por grau e um OXC para cada dois graus.

Em virtude da utilização de múltiplos dispositivos OXC devido à limitação do número de portas, torna-se necessário o uso de *splitters* para que um canal de um grau específico possa ser removido do sistema a partir de qualquer porta do

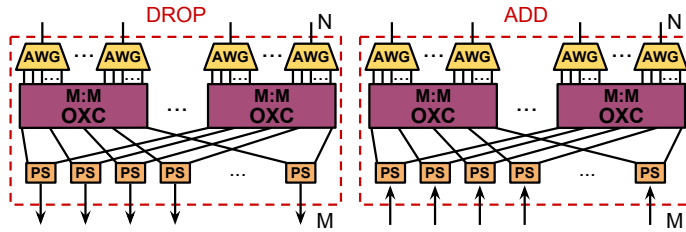


Fig. 4. Módulo Add-Drop Global com OXC.

drop. Por isso, cada *splitter* deve conectar-se a todos os OXCs. Note que o *splitter* varia de acordo com o número de graus do ROADM, portanto, dependendo da perda de potência do sinal, torna-se necessário o uso de amplificadores, assim como acontece com o MCS.

D. ROADM-CD: OXC + WSS

Uma variação da proposta anterior é apresentada em [4]. O modelo utiliza a base da arquitetura apresentada em [10] com a adição de WSSs e *splitters* no *add-drop* para agregação dos sinais dos graus, como ilustrado na Figura 5. Um ponto de atenção desta arquitetura é a independência de comprimento de onda e direção, porém com implicações com relação à contenção.

O objetivo é minimizar custos e aumentar a escalabilidade do sistema a partir da redução no número de OXCs e AWGs. Em contrapartida, inserem-se restrições de contenção à proposta. No entanto, de acordo com [10], esse efeito indesejável pode ser mitigado com a utilização de algoritmos de RWA (*Routing Wavelength Assignment*).

IV. ANÁLISE E RESULTADOS

Com o propósito de apresentar um estudo comparativo entre as arquiteturas de ROADM-CD que utilizam as tecnologias *multicast switching* e *optical cross-connect*, o presente trabalho realizou um levantamento de custo das arquiteturas III-B, III-C e III-D com base no número de graus do sistema e na quantidade de portas de *add-drop*. A arquitetura descrita em III-A não possui aplicação prática devido a sua restrição e custo, de forma que não será considerada na análise. Utilizou-se a variação de 2, 4, 6 e 8 graus e até 100% de *add-drop* para uma rede de 96 canais por enlace. Os custos foram estimados através de levantamento feito em conjunto com os fabricantes de componentes ópticos. Não foram considerados custos secundários como mecânica, confecção de placas de circuito impresso etc.

Na computação do custo da porta de *add-drop* considerou-se apenas a infraestrutura adicional necessária para a construção do *add-drop* global, que compreende, além dos módulos OXC e MCS, componentes como *splitter*, WSS, AWG e EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*). Portanto o cálculo do custo por porta (C_{porta}) pode ser obtido do custo total do ROADM (C_{total}) subtraído do custo dos graus de linha (C_{linha}) e o resultado dividido pelo número de portas de *add-drop* (N_{portas}), como expressado pela fórmula:

$$C_{porta} = \frac{C_{total} - C_{linha}}{N_{portas}} \quad (1)$$

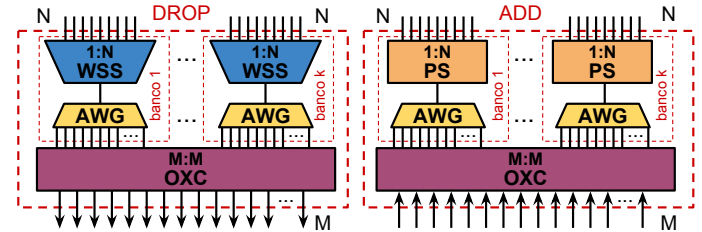


Fig. 5. Módulo Add-Drop Global com OXC e WSS.

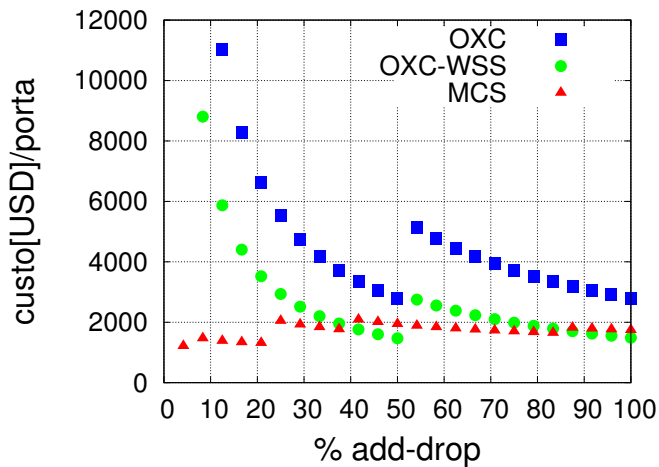
As arquiteturas de ROADM foram construídas considerando os seguintes valores de perda de inserção para os componentes: MCS=17dB, WSS=6dB, AWG=4dB e OXC=1dB. Para os *splitters*, cuja perda é dependente do número de portas de saída, foram utilizados valores teóricos. Neste sentido, considerando-se uma sensibilidade de recepção típica de -14dBm, a maior parte das arquiteturas necessitam do uso de amplificadores ópticos no *add-drop*, principalmente os sistemas com MCS, devido à grande atenuação do componente. Os sistemas com OXC, apesar da baixa atenuação, precisam também de amplificadores em alguns casos devido ao uso de *splitters* na conexão dos bancos de *add-drop*.

Para amplificação do sinal no *add-drop* foi considerado o uso de *arrays* de amplificadores com bombeio compartilhado, resultando em uma redução de custo considerável.

Para exemplificar, o gráfico da Figura 6 apresenta a variação do custo por porta de *add-drop*, com valores normalizados, para as arquiteturas III-B, III-C e III-D de um ROADM grau 4. Nota-se que a arquitetura com MCS apresenta predominantemente menor custo por porta para até 20% de *add-drop*. A medida que esse percentual aumenta a vantagem de custo por porta oscila entre MCS e OXC. Este comportamento está atrelado à escalabilidade de cada tecnologia, pois o MCS apresenta maior granularidade sendo possível escalar o *add-drop* em um incremento de 16 portas, enquanto o OXC restringe os bancos de *add-drop* de 192 portas cada. Portanto, a cada incremento de banco com OXC a infraestrutura investida é bastante alta.

Por outro lado, a arquitetura com OXC+WSS apresenta menor custo por porta a partir de 25% de *add-drop* com relação as outras duas propostas. No entanto, deve-se levar em conta que a arquitetura III-D apresenta contenção controlada, que pode ser mitigada a partir de algoritmos RWA no plano de controle. Vale ressaltar que essa contenção varia com o número de bancos de *add-drop*, podendo tornar-se *contentionless* quando o número de bancos é maior ou igual ao número de graus de linha do sistema ROADM, como demonstrado em [4].

O mesmo estudo foi realizado para sistemas ROADMs com 2, 6 e 8 graus. A partir dos valores computados é possível realizar uma análise comparativa da porcentagem de *add-drop* em relação ao número de graus. O gráfico da Figura 7(a) apresenta os intervalos de porcentagem de *add-drop* para cada configuração de grau em que as arquiteturas MCS e OXC representam menor custo/porta. Os resultados indicam predominante vantagem do MCS, onde o OXC mostra-se interessante para um perfil de baixo número de graus e muitas portas de *add-drop*.

Fig. 6. Custo normalizado por porta de *add-drop* em um ROADM grau 4.

O gráfico da Figura 7(b) apresenta a mesma análise anterior para as propostas III-B e III-D. Nesta comparação a arquitetura com MCS ainda predomina para pequenas porcentagens de *add-drop*, porém o OXC+WSS assume agora uma importância significativa. A partir de 96 portas de *add-drop* essa arquitetura passa a ser vantajosa para qualquer configurações de grau.

Assim, observa-se um ganho significativo do OXC quando comparado ao gráfico da Figura 7(a). Portanto ao inserir contenção controlada à arquitetura, torna-se viável o uso do OXC para uma maior gama de configurações do sistema.

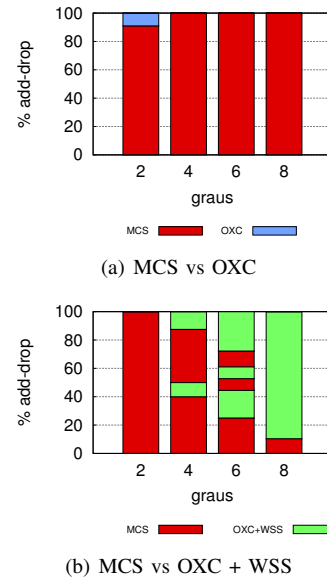
Contudo, a partir dos gráficos da Figura 7 conclui-se que a tecnologia MCS apresenta maior eficiência para sistemas ROADM de grau 2 com até 50% de *add-drop*, aproximadamente. Todavia, 50% de *add-drop* em um sistema grau 2 representa apenas 96 portas. Se considerarmos que um sistema de grau 2 assume o posto de um elemento de borda da rede, é esperado uma grande quantidade de portas para entrada dos clientes na rede, portanto as arquiteturas com OXC podem ser interessantes também nesse cenário.

É importante salientar que essa análise não considerou o uso de filtros sintonizáveis para arquitetura MCS, portanto restringe-se apenas a sistemas com detecção coerente. Já as arquiteturas baseadas em OXC não apresentam essa limitação.

V. CONCLUSÕES

Agregar maior flexibilidade às redes ópticas é um requisito mandatório para próxima geração. Contudo, criar uma arquitetura economicamente viável de ROADM sem contenção e independente de comprimento de onda e direção é um grande desafio para as tecnologias disponíveis hoje. Nesta direção, as tecnologias MCS e OXC apresentam-se com um grande potencial de aplicação em arquiteturas ROADM-CDC.

Os resultados do estudo comparativo apresentado neste artigo indicam que existe espaço para aplicação tanto da tecnologia MSC como OXC. O primeiro destaca-se em configurações com baixa porcentagem de *add-drop*, enquanto o último leva

Fig. 7. Análise da % de *add-drop* em relação ao número de graus.

vantagem com muitas portas de *add-drop*, especialmente na configuração OXC+WSS.

Considerando-se uma tendência dos nós de borda da rede terem poucos graus e muitas portas de *add-drop* a tecnologia OXC atenderia melhor, enquanto que para os nós de núcleo, com muitos graus e pouco *add-drop*, o MCS leva vantagem.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer à Fundação CPqD e ao FUNTEL, por financiarem este trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Perrin, "The need for next-generation roadm networks." Heavy Reading, September 2010.
- [2] L. Eldada, "Roadm architectures and technologies for agile optical networks." DuPont Photonics Technologies, 100 Fordham Road, Wilmington, MA, 01887, USA, 2007, p. Proc. SPIE 6476.
- [3] M. D. Feuer, S. L. Woodward, P. Palacharla, X. Wang, I. Kim, and D. Bihon, "Intra-node contention in dynamic photonic networks," *J. Lightwave Technol.*, vol. 29, no. 4, pp. 529–535, Feb 2011.
- [4] P. Pavon-Marino and M.-V. Bueno-Delgado, "Distributed online rwa considering add/drop contention in the nodes for directionless and colorless roadms," in *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2012.
- [5] S. Tibuleac and M. Filer, "Trends in next-generation roadm networks," in *37th European Conference and Exposition on Optical Communications*. Optical Society of America, 2011, p. Th.12.A.1.
- [6] J. Zyskind and A. Srivastava, *Optically Amplified WDM Networks*, ser. Academic Press. Elsevier, 2010.
- [7] B. N. Manish Sharma, Per Hansen and P. Wigley, "Next-generation roadm technologies and architecture," Proc. SPIE 8283, 828309 (2012).
- [8] T. Watanabe, K. Suzuki, T. Goh, K. Hattori, A. Mori, T. Takahashi, T. Sakamoto, K. Morita, S. Sohma, and S. Kamei, "Compact plc-based transponder aggregator for colorless and directionless roadm," in *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2011.
- [9] W. I. Way, "Optimum architecture for mxn multicast switch-based colorless, directionless, contentionless, and flexible-grid roadm," in *National Fiber Optic Engineers Conference*. Optical Society of America, 2012.
- [10] A. Lord, R. Jensen, and N. Parsons, "Highly scalable oxc-based contentionless roadm architecture with reduced network implementation cost," in *National Fiber Optic Engineers Conference*. Optical Society of America, 2012.