

Método para consideração de restrições em ROADMs na definição de caminhos ópticos utilizando algoritmos de RWA genéricos

Giovanni Curiel dos Santos, Raul Negreiros, Renato Foot de Guimarães, Rafael Scaraficci

Resumo — Redes de comutação óptica apresentam inúmeras vantagens em comparação às redes baseadas em comutação eletrônica como maior transparência, menor consumo de energia e menor custo total. Com a introdução dos ROADMs a comutação óptica dinâmica de comprimentos de onda passou a ser uma realidade, reduzindo significativamente os custos de operação e aumentando a agilidade na criação de caminhos ópticos na rede. Contudo, os ROADMs ainda apresentam diversas restrições, especialmente em relação às operações de inserção e remoção de canais. Atualmente a proposta mais comum para contornar essas limitações é a utilização de uma solução de plano de controle com algoritmos de RWA capazes de lidar com essas complexidades. Entretanto, adicionar estas restrições diretamente nos algoritmos de RWA é uma abordagem complexa e de baixa praticidade. Esse artigo propõe um novo método capaz de lidar com as restrições no nível do plano de controle independentemente do algoritmo de RWA adotado. O método é validado através de intensa simulação computacional realizada em diversos cenários de rede.

Palavras-Chave—Plano de controle, RWA, ROADM, contenção.

Abstract— Optical networks present several advantages over networks based on electronic switching, such as: transparency, lower power consumption and lower overall cost. With the introduction of ROADMs, dynamic optical data planes became a reality, reducing the OPEX and increasing the agility of lightpaths creation. However, ROADMs still have several constraints related to add- and drop-operations. To overcome these limitations the use of a control plane solution with RWA aware algorithms of such constraints is commonly proposed. Nevertheless, adding the constraints directly on the RWA computation is a complex approach. This paper proposes a new method able to deal with the constraints in the control plane level independently of the adopted RWA algorithm. The method is validated through intense computer simulation considering several network scenarios.

Keywords—Control plane, RWA, ROADM, contention

I. INTRODUÇÃO

Operadoras de redes de telecomunicações têm usado em larga escala multiplexadores ópticos insere/deriva reconfiguráveis (ROADM - *Reconfigurable Add/Drop Multiplexer*) [1-4], pois permitem a criação e reconfiguração de caminhos ópticos de maneira automática via software, reduzindo e, em certos casos, eliminando a necessidade de configurações manuais. Além disso, os ROADMs comutam os sinais completamente no domínio óptico, sem necessidade de qualquer conversão opto-eletrônica (OEO). Desta forma, a criação e manutenção dos caminhos na rede se tornam bem mais simples, reduzindo os custos operacionais.

Giovanni Curiel dos Santos, Raul Negreiros, Renato Foot de Guimarães, Rafael Scaraficci, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, Campinas – SP, Brasil. Emails: {gcuriel, rauln, renatog, raugusto}@cpqd.com.br

Diferentes tecnologias podem ser utilizadas na chave óptica de um ROADM. A primeira que apresentou apelo para o mercado é a PLC (*Planar Lightwave Circuit*) [5], que utiliza guias de onda em circuitos integrados. Contudo, apesar do seu custo reduzido em relação a outras tecnologias, é pouco flexível, viabilizando apenas portas insere/deriva fixas em comprimentos de onda (cor), além de suportar apenas dois graus (portas de rede), o que inviabiliza a criação de topologias mais complexas do que anéis. A tecnologia que sucedeu a PLC na aplicação em ROADMs é a WSS (*Wavelength Selective Switch*). Mais flexível, esta permite um maior número de graus e portas insere/deriva sem cor fixa.

Os ROADMs tornam a rede óptica mais flexível e, por consequência, deixam o roteamento mais complexo devido ao maior número de combinações possíveis. Para facilitar a configuração e o gerenciamento de uma conexão óptica, órgãos de padronização definiram arquiteturas de controle, tais como o GMPLS (*Generalized Multi-Protocol Label Switching*) e o ASON (*Automatically Switched Optical Network*) [6, 7], que permitem automatizar a configuração do plano de transporte. Nestas arquiteturas algoritmos de RWA (*Routing Wavelength Assignment*) são utilizados para otimizar o uso dos recursos da rede.

Apesar dos grandes avanços alcançados nos últimos anos, ROADMs ainda são elementos bastante limitados se comparados aos comutadores eletrônicos, como mostrado em maiores detalhes na seção II. Assim, o processo de escolha de um caminho óptico deve considerar essas limitações. Caso contrário, um caminho, mesmo que disponível na rede, pode não ser configurado devido às restrições na arquitetura dos nós. Uma possibilidade é considerar essas restrições diretamente no algoritmo de RWA, porém essa abordagem traz dois consideráveis problemas. Em primeiro lugar, cria-se uma dependência do algoritmo às diferentes arquitetura de nós que podem existir na rede. Idealmente o algoritmo deve ser independente a esta questão, podendo ser aplicado em qualquer rede. Em segundo lugar, essa abordagem torna os algoritmos de RWA ainda mais complexos, dificultando o seu desenvolvimento.

Neste contexto, este trabalho propõe um novo método para a consideração de restrições na escolha do caminho óptico independentemente do algoritmo de RWA utilizado. Em trabalhos anteriores [8-10] desenvolveu-se o modelamento dessas restrições para diferentes arquiteturas. Agora, este modelo será usado na decisão da escolha do caminho da rede através do método proposto.

O método se constitui dos seguintes passos (filtros): conformidade de portas, conformidade de transmissão, remoção dos recursos indisponíveis, cálculo de rota e pós-análises. Para testar a validade da solução, o método foi implementado e simulações foram feitas a fim de extrair a taxa de bloqueio do processo de cálculo de rota, composto pelo método proposto e pelo algoritmo de RWA.

O restante deste trabalho está dividido da seguinte forma: na seção II é realizada uma breve apresentação sobre as restrições de conexão dos ROADMs, na seção III é apresentada a modelagem do nó considerando estas restrições. Na seção IV, o mecanismo de filtros usado é detalhado e analisado. A taxa de bloqueio é apresentada na seção V, seguido das conclusões, apresentadas na seção VI.

II. RESTRIÇÕES DE CONEXÃO EM ROADM

Diferentemente do que ocorre em redes comutadas no domínio eletrônico, existem várias restrições de conexão apresentadas pelos atuais equipamentos de chaveamento óptico. As próximas subseções tratam de duas restrições importantes nas montagens de nós com ROADMs WSS: (a) portas insere/deriva fixas tanto em direção quanto em cor e (b) a contenção de sinais.

A. Portas fixas em direção e cor

Algumas montagens de nós com ROADM podem apresentar uma associação fixa entre portas de insere/deriva e portas de rede. Como exemplo, a Fig. 1 descreve as conexões de um nó de comutação baseado em ROADM WSS com três portas de rede e três grupos de portas insere/deriva [12, 13].

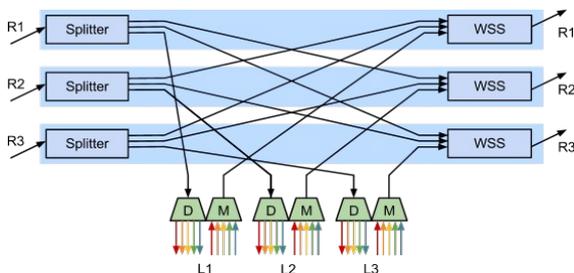


Fig. 1 Restrições de conexão em um ROADM

Note que os grupos de portas insere/deriva (L1, L2, e L3) estão conectadas diretamente às portas de rede (R1, R2 e R3). Portanto, um determinado sinal que for inserido em uma porta de L1, por exemplo, obrigatoriamente será encaminhado para a porta R1. Neste caso, classificam-se as portas insere/deriva como fixas em direção, ou seja, o uso de uma porta insere/deriva determina qual será a porta de rede utilizada na conexão. Portas com esta característica são definidas como portas locais. Outra limitação da arquitetura apresentada na Fig. 1 são os multiplexadores e demultiplexadores nas portas insere/deriva. Estes equipamentos definem que apenas um determinado comprimento de onda seja utilizado em uma porta, caracterizando-a como fixa em cor.

Existem, na literatura, várias propostas de arquiteturas sem estas restrições [14-16]. Entretanto, as arquiteturas propostas tipicamente utilizam uma grande quantidade de chaves ópticas, o que aumenta consideravelmente o custo do nó [17], podendo inviabilizar seu uso em redes comerciais.

B. Restrição por contenção

Um exemplo de restrição por contenção é mostrado na Fig. 2 que apresenta um nó com três grupos de portas insere/deriva fixas em direção e cor (L1, L2 e L3) e um grupo de portas insere/deriva que não possui estas restrições (G1) [12].

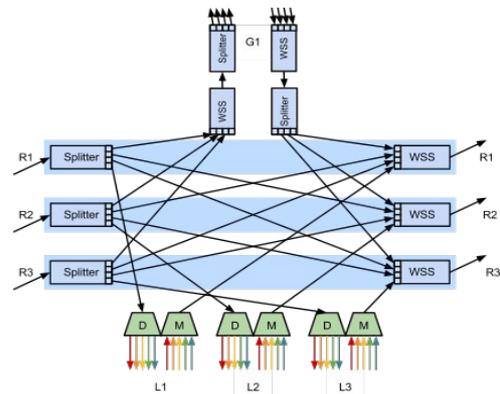


Fig. 2 Exemplo de ROADM com portas locais e globais

Conforme a arquitetura do nó da Fig. 2, um sinal em comprimento de onda L, inserido em uma das portas de G1 pode ser encaminhado para uma das portas de rede (R1, R2 ou R3), classificando esta porta como sem restrição de direção (definindo-a como uma porta global) e sem restrição de cor. Para permitir esta configuração, são necessárias duas chaves WSS adicionais para as portas insere/deriva. Entretanto, esta montagem possui limitações importantes: nas portas de G1 não é possível utilizar simultaneamente os mesmos comprimentos de onda provenientes de diferentes graus. Este tipo de bloqueio caracteriza uma contenção. Várias outras propostas visam solucionar esta limitação [15, 16, 18], porém, o trabalho descrito em [19] demonstra que as situações de contenção podem ser contornadas através do uso de um algoritmo de RWA ciente de tais limitações.

III. MODELO DO NÓ

Para a implementação das considerações de restrições do ROADM, foi adotada a arquitetura de nó apresentada na Fig. 3. Nela, são mostradas as portas de rede (portas R, compostas pelas entradas dos splitters e pelas saídas das chaves WSS), portas de inserção/derivação locais (portas L) e portas insere/deriva globais (portas G). Além disso, são apresentados os transmissores, representados pelos blocos T, responsáveis pela geração e recepção dos sinais ópticos a serem inseridos e derivados no nó de comutação.

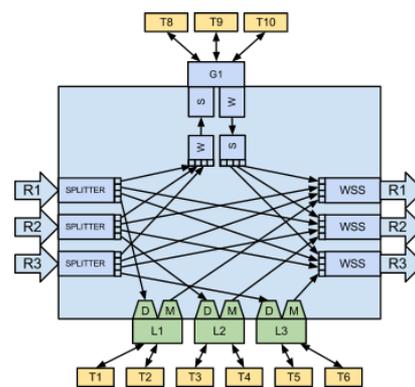


Fig. 3 Exemplo de modelo usado

A modelagem do nó e suas restrições são implementadas através da criação de novos parâmetros dos enlaces para engenharia de tráfego e da definição de valores especiais para os parâmetros já existentes. Para tal, é criado um modelo denominado *TE Link* que representa a conectividade entre dois nós. Esta modelagem é detalhada a seguir.

A. Restrições de conexão

O modelamento das restrições de conexão de um nó é feito através de parâmetros no *TE link*. As modificações consistem na adição de três parâmetros: o identificador de uma porta do equipamento do plano de transporte instalado localmente, um identificador do tipo da porta representada (local, global ou de rede) e uma lista de grupos de conexão, como foi proposto em [8]. O identificador da porta especifica qual interface do equipamento do plano de transporte é usada na conexão representada pelo *TE link*. Este parâmetro é essencial durante a configuração de um caminho, já que ele define qual das placas WSS será configurada. Já os grupos de conexão definem quais portas podem ser interconectadas. Para exemplificar este conceito, a Fig. 4 apresenta os grupos de conexão devidamente associados para o nó apresentado na Fig. 3.

Neste exemplo, a porta L1 pertence ao grupo {1} e a porta R1 pertence aos grupos {1, 255}. Desta forma, como existe um grupo em comum entre estas duas portas (grupo {1}), estas podem ser interconectadas. Já as portas L2 e G1 não podem ser interconectadas, uma vez que não possuem nenhum grupo de conexão em comum.

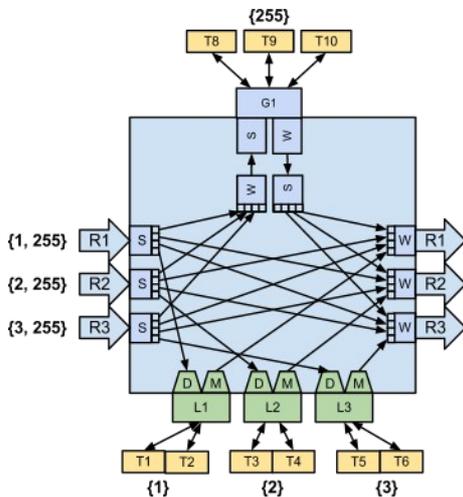


Fig. 4 Modelo com grupos de conexão

B. Transmissores

Os transmissores também são modelados no plano de controle através de *TE links*. A diferença, neste caso, está na necessidade de um nó diferenciar os transmissores dos demais *TE Links*, sendo utilizado para tal identificadores específicos para este fim.

Na próxima seção será apresentado o algoritmo proposto neste trabalho.

IV. MÉTODO PROPOSTO

O princípio do método proposto neste trabalho é a de alterar as informações topológicas para que o algoritmo de RWA use apenas aqueles recursos que podem ser efetivamente configurados no plano de transporte. Tais alterações levam em consideração os transmissores instalados e as portas insere/deriva em que estão conectados ao ROADM WSS, além do tipo das portas (local, global ou de rede). Estas informações estão presente no modelo de *TE Link*. As modificações feitas pelas análises são compostas pela alteração controlada da lista de comprimentos de onda disponíveis em cada um dos enlaces da topologia e remoção de determinados enlaces. Estas análises são divididas em cinco fases:

1. Conformidade de porta;
2. Conformidade de transmissão;
3. Remoção dos recursos indisponíveis;
4. Cálculo de rota (execução do algoritmo RWA);
5. Pós-análise;

É importante notar que a execução do algoritmo de RWA (passo 4) usa como entrada o grafo da topologia já alterada pelas fases anteriores (1, 2 e 3) e, portanto, de acordo com os transmissores instalados e a restrições de conexão dos ROADMs. Todas as cinco fases são detalhadas nas seções seguintes.

Os parâmetros de entrada do método consistem nas seguintes informações: identificadores da origem e do destino do caminho, escolha do tipo de porta insere/deriva a ser usada (local, global ou escolha indiferente), um conjunto de vértices v representando os nós da rede, um conjunto de enlaces e interligando os vértices, um conjunto de transmissores t , conjuntos de grupos de conexão g associados aos enlaces e transmissores.

A. Conformidade de portas

A topologia (consistindo em v , t e e) é submetida a um filtro de conformidade de tipos de portas, conforme o pseudo-código mostrado no Algoritmo 1. Esta fase tem como objetivo separar os transmissores que poderão ser utilizados no nó de origem e destino. Para esta escolha, é usada a definição do tipo de porta insere/deriva definida na requisição de cálculo de rota. O custo computacional desta fase é $O(e+t)$.

```
filtro_de_conformidade_de_tipos_de_portas() {
- Separe todos os transmissores pertencentes ao nó de origem que sejam compatíveis com o tipo de porta especificado na requisição;
- Separe todos os transmissores pertencentes ao nó de destino que sejam compatíveis com o tipo de porta especificado na requisição;
- Desabilite os demais transmissores;
}
```

Algoritmo 1 Pseudo-código para conformidade de portas

B. Conformidade de transmissão

O filtro de transmissão, apresentado no Algoritmo 2, leva em consideração as exigências de QoS (*Quality of Service*) fornecidas na requisição, eliminando assim os transmissores que não as atendem. Além destes, são removidos dos enlaces os comprimentos de onda que não estão disponíveis nos transmissores selecionados como candidatos. O custo computacional desta fase é $O(e + (t_j * t_i))$, onde t_i é o número de transmissores no nó de entrada e t_j é o número de transmissores no nó de saída.

```
filtro_de_transmissão() {
- Para todo transmissor conectado ao nó de origem que tenha um profile de QoS compatível: armazene seus comprimentos de onda juntamente com seu respectivo grupo de transmissão;
- Para todo transmissor conectado ao nó de destino que tenha um profile de QoS compatível: armazene seus comprimentos de onda juntamente com seu respectivo grupo de transmissão;
- Remova dos enlaces conectados ao nó de origem os comprimentos de onda que não existem nos transmissores dos grupos pertencentes ao enlace;
```

```

- Remova dos enlaces conectados ao nó de destino
os comprimentos de onda que não existem nos transmissores
dos grupos pertencentes ao enlace;
- Remova dos enlaces os comprimentos de onda não
disponíveis nos transmissores;
}

```

Algoritmo 2 Pseudo código para conformidade de transmissão

C. Remoção dos recursos indisponíveis

Esta fase tem por finalidade desabilitar todos os enlaces que não atendem a banda requerida ou que não possuem mais nenhum comprimento de onda disponível. O custo computacional desta fase é $O(e+t)$.

D. Cálculo de rota

O cálculo de rota propriamente dito é executado nesta fase, detalhada no Algoritmo 3. O custo computacional é $O(n + v \log(v))$, considerando o algoritmo de Dijkstra para o RWA.

```

Calculo() {
- Execute o algoritmo de cálculo de rota;
- Faça a intersecção dos comprimentos de onda entre
todos os enlaces da rota encontrada;
}

```

Algoritmo 3 Pseudo-código para cálculo de rota

E. Pós-análises

As últimas análises têm por finalidade a seleção de quais transmissores serão efetivamente usados na rota calculada. Estas análises, mostradas no Algoritmo 4, montam uma estrutura contendo os comprimentos de onda disponíveis separadas por grupo de conexão nos nós de origem e destino. Desta forma, é possível encontrar um conjunto de transmissores que atendam à requisição feita. O custo computacional é $O(g_i * g_j * \max\{t_i, t_j\})$, onde g_i é o grupo de transmissão de origem e g_j é o grupo de transmissão de destino.

```

filtro_de_pós_analise_de_grupo() {
- Para o nó de ingresso e egresso, selecionar
quais transmissores possuem ao menos um grupo de
conexão em comum com a primeira interface (para a
análise no nó de ingresso) ou última interface (na
análise do nó de egresso) da rota;
- Montar duas estruturas, uma relacionada ao nó de
origem e outra ao nó de destino, que separem por
grupo de conexão a intersecção dos comprimentos de
onda disponíveis na rota calculada e nos transmissores
que possuem o grupo de conexão analisado;
- Encontre o par de transmissores de origem/destino
que possui ao menos um comprimento de onda em
comum e cujo grupo de conexão possua ao menos um
comprimento de onda (identificável na estrutura
criada no passo anterior), priorizando o uso de
portas locais.
}

```

Algoritmo 4 Pseudo código para pós-análises

Analisando todo o algoritmo obtém-se o custo computacional de $O(e + t + (t_i * t_j) + g_i * g_j * \max\{t_i, t_j\} + v \log v)$. Vê-se, portanto, que a quantidade de transmissores traz um impacto significativo ao algoritmo. Supondo a utilização de transmissores sintonizáveis e a eliminação dos comprimentos de onda que estão sendo utilizados em todos os transmissores da mesma porta, bloqueios por contenção podem ser minimizados [19], justificando a complexidade adicional causada pelos filtros.

V. RESULTADOS

Para a comprovação da funcionalidade do método proposto, foram levantadas as taxas de bloqueio do processo de cálculo de rota. Para tal, foi utilizada a topologia da rede da NSFNET [20], que possui nós de 2, 3 e 4 graus, como mostrado na Fig. 5. O algoritmo de RWA empregado nos testes é uma combinação do algoritmo de Dijkstra para o cálculo de rota e da abordagem *First-Fit* para a seleção do comprimento de onda.

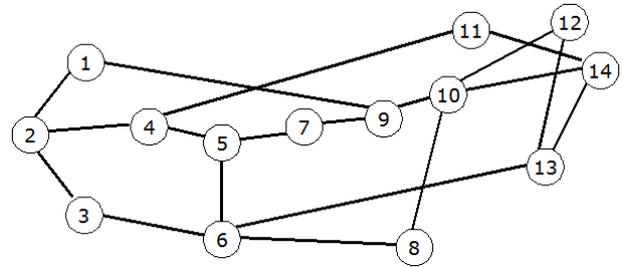


Fig. 5 Topologia da NSFNet

Dentro desta mesma topologia de rede, foram considerados seis cenários de testes: (1) três grupos de portas insere/deriva globais em cada nó com 10 transmissores sintonizáveis em cada grupo e até 10 comprimentos de onda por porta de rede; (2) três grupos de portas insere/deriva globais em cada nó com 10 transmissores sintonizáveis em cada grupo e até 40 comprimentos de onda por porta de rede; (3) três grupos de portas insere/deriva globais em cada nó com 10 transmissores sintonizáveis em cada grupo e até 80 comprimentos de onda por porta de rede; (4) três grupos de portas insere/deriva globais em cada nó com 20 transmissores sintonizáveis em cada grupo e até 10 comprimentos de onda por porta de rede; (5) três grupos de portas insere/deriva globais em cada nó com 20 transmissores sintonizáveis em cada grupo e até 40 comprimentos de onda por porta de rede; (6) três grupos de portas insere/deriva globais em cada nó com 20 transmissores sintonizáveis em cada grupo e até 80 comprimentos de onda por porta de rede.

A extração da taxa de bloqueio foi feita gerando-se 10000 requisições entre nós selecionados de forma aleatória. A carga da rede foi simulada fixando-se o tempo total de geração das requisições, definindo-se o período entre cada requisição de forma a seguir uma distribuição de Poisson e alterando-se de forma controlada o tempo de vida dos LSPs. Durante os testes, verificou-se que o número de requisições é suficientemente grande para que a porcentagem de pedidos bloqueados tenha se estabilizado ao final da simulação. Com estes cenários, os gráficos mostrados na Fig. 6 e Fig. 7 foram extraídos.

Na Fig. 6, observa-se que a curva do cenário 2 é bastante próxima à do cenário 3. Caso apenas o algoritmo de RWA fosse utilizado (Dijkstra e *First-Fit*), seria esperado que estas duas curvas fossem notavelmente distintas, uma vez que o número de comprimentos de onda disponíveis em cada enlace do cenário 3 é o dobro do definido no cenário 2. Entretanto, como mecanismo proposto é empregado, a escassez de transmissores passa a compor grande parte dos bloqueios gerados, já que ambos os cenários possuem o mesmo número destes equipamentos e também apresentam a mesma taxa de bloqueio. Já no cenário 1, conclui-se que a maior parte dos bloqueios gerados tenha origem na falta de comprimentos de onda disponíveis nas portas de rede.

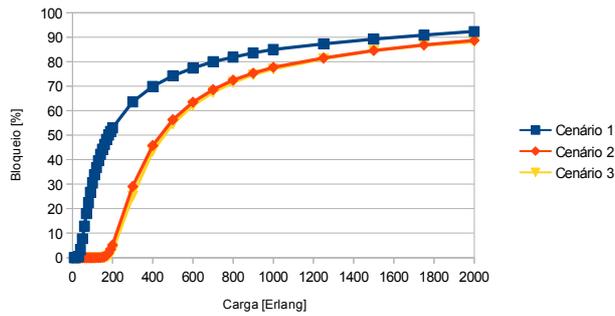


Fig. 6 Taxa de bloqueio para os cenários 1, 2 e 3

Na Fig. 7, são apresentadas as taxas de bloqueio dos cenários 4, 5 e 6, os quais apresentam 20 transmissores em cada grupo de portas insere/deriva globais. Nota-se que a curva referente ao cenário 4 é bastante semelhante à do cenário 1, comprovando a falta de comprimentos de onda disponíveis nos enlaces como gerador de grande parte dos bloqueios. Já as curvas do cenário 5 e 6 apresentam uma diferença maior do que as do cenário 2 e 3 na Fig. 6. Isto se deve à adição de transmissores adicionais em cada grupo de porta insere/deriva.

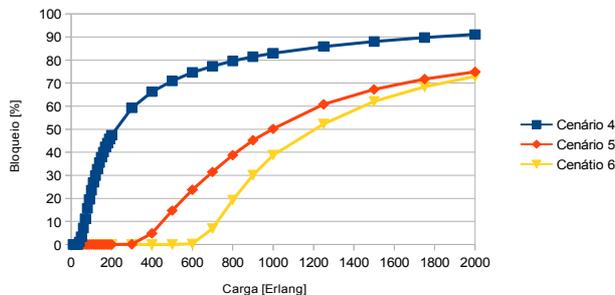


Fig. 7 Taxa de bloqueio para os cenários 4, 5 e 6

É essencial notar que o aumento da taxa de bloqueio devido ao uso do mecanismo proposto é causa direta da análise das restrições de conexão dos ROADMs e dos transmissores instalados. Portanto, utilizar apenas o algoritmo de RWA seria considerar válida uma rota que desrespeitasse estas restrições, não sendo possível configurá-la e utilizá-la no plano de transporte.

VI. CONCLUSÕES

Foi apresentado neste trabalho um novo método para consideração de restrições de conexão em ROADMs para utilização em conjunto com algoritmos de RWA. Foram levantadas também as curvas referentes à taxa de bloqueio do processo de cálculo de rota, formado pelo método proposto e um algoritmo simples de RWA (Dijkstra e *First-Fit*). Com as curvas das taxas de bloqueio, conclui-se que o método é funcional já que consegue bloquear rotas que desconsideram os transmissores instalados e as restrições de conexão apresentadas pelos ROADMs. Como apresentado, a complexidade deste método não é desprezível, sendo comparável à complexidade do algoritmo de cálculo de rota. Entretanto, como visto, é essencial que tais análises sejam feitas para que a rota calculada possa ser efetivamente configurada pelo plano de controle.

REFERÊNCIAS

- [1] A. A. M. Saleh e J. M. Simmons, "Evolution toward the next-generation core optical network" J. Lightw. Technol., vol. 24, no. 9, pp. 3303–3321, Maio 2006.
- [2] E. B. Basch, R. Gregorov, S. Gringeri, and S. Elby, "Architectural tradeoffs for reconfigurable dense wavelength-division multiplexing systems" IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol. 12, no. 4, pp. 615–626, Jul./Ago. 2006.
- [3] S. Gringeri, B. Basch, V. Shukla, R. Egorov, T. J. Xia, "Flexible architectures for optical transport nodes and networks" IEEE Comm. Mag., Julho 2010.
- [4] M. D. Feuer et al., "ROADMs and their system applications", Optical Fiber Telecommunications, Vol. B: Systems and Networks, Elsevier Inc., Reino Unido, 2008.
- [5] L. Elada et al. "40-Channel ultra-low-power compact PLC-based ROADM subsystem". OFC/NFOEC 2006, Março 2006
- [6] E. Mannie, "Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture" RFC 3945, Outubro 2004.
- [7] Recommendation G.8080/Y.1304: Architecture for the automatic switched optical networks (ASON). ITU-T
- [8] G.C. Santos, F.D. Santos, J.C.R.F. Oliveira, "Aprovisionamento Automático de Circuitos Ópticos Protegidos via Plano de Controle GMPLS Considerando Restrições de Camada Física", SBrt 2009, Blumenau, Brasil.
- [9] G. C. Santos, F. D. Santos, J. C. R. F. Oliveira, R. A. Moreira, M. R. Salvador, M. F. Magalhães, "Quantitative Bandwidth Analysis of Automatic Circuit Provisioning on ROADM-based Networks using GMPLS Control Plane", Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2009 SBMO/IEEE MTT-S International, pp.664-668, 3-6 Nov. 2009
- [10] G. C. Santos, "Proposta e implementação de plano de controle GMPLS para redes WDM reconfiguráveis". Dissertação de Mestrado. Unicamp, São Paulo, 2010
- [11] S. Azodolmolky et al., "A survey on physical layer impairments aware routing and wavelength assignment algorithms in optical networks", Computer Networks 53 (2009) 926–944
- [12] S. Gringeri; B. Basch; V. Shukla; R. Egorov; T.J. Xia; "Flexible architectures for optical transport nodes and networks" Communications Magazine, IEEE, vol.48, no.7, pp.40-50, Julho 2010
- [13] V. Kaman; R. J. Helkey; J.E. Bowers, "Multi-Degree ROADM's with Agile Add-Drop Access" Photonics in Switching, 2007, pp.31-32, 19-22 Ago. 2007
- [14] R.A. Jensen, "Optical switch architectures for emerging Colorless / Directionless / Contentionless ROADM networks" Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference, pp.1-3, 6-10 Março 2011
- [15] Y. Sakamaki et al., "Experimental demonstration of colourless, directionless, contentionless ROADM using 1x43 WSS and PLC-based transponder aggregator for 127-Gbit/s DP-QPSK system" Optical Communication (ECOC), 2011 37th European Conference and Exhibition on, pp.1-3, 18-22 Set. 2011
- [16] T. Kawai et al., "Multi-degree ROADM based on massive port count WSS with integrated Colorless ports" Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference, pp.1-3, 6-10 Março 2011
- [17] Mezhoudi, M.; Ying Hu; "Economic analysis of NG-optical backbone transport network" Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), 2011 20th Annual, pp.1-6, 15-16 Abril 2011
- [18] M.D. Feuer, S.L. Woodward; P. Palacharla; Xi Wang; Inwoong Kim; D. Bihon; "Intra-Node Contention in Dynamic Photonic Networks" Lightwave Technology, Journal of, vol.29, no.4, pp.529-535, Fev.15, 2011
- [19] P. Pavon-Marino, M. V. Bueno-Delgado, "Distributed online RWA considering add/drop contention in the nodes for directionless and colorless ROADMs", OFC 2012
- [20] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, "Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 14, no. 5, pp. 840–851, Jun. 1996.