

Estratégia de Roteamento em Algoritmos IA-RWA para Redes Ópticas – Uma avaliação da Dispersão de Modo de Polarização

Alexsandra F. Gomes¹, Carlos E. M. Fernandes¹, Victor A. P. Oliveira¹ e Iguatemi E. Fonseca¹

Resumo — Este artigo apresenta uma proposta de algoritmo RWA com a utilização de técnicas de roteamento para provimento de Qualidade de Serviço, avaliando o efeito degradante do sinal óptico durante a transmissão, a Dispersão de Modo de Polarização. Os resultados das simulações numéricas indicam que uma melhora no desempenho da rede pode ser conseguida se rotas alternativas são utilizadas.

Palavras-chaves — Algoritmos RWA, PMD, Roteamento, QoS Óptico, Redes Ópticas Dinâmicas.

Abstract — This paper presents a proposal of a Routing and Wavelength Assignment algorithm that use a routing strategy taking into account monitored physical layer attributes as input parameters for the path computation. The proposed routing technique aims at to achieve optical quality of service (OQoS) in optical network impaired by Polarization Mode Dispersion (PMD). Numerical results show that the network performance can be improved when alternative routes are used.

Keywords— RWA algorithm, Routing, PMD, QoS, Dynamic Optical Networks.

I. INTRODUÇÃO

Caso o tráfego continue crescendo no ritmo atual, com o surgimento e consolidação aplicações como vídeo sob demanda, o esquema de eletrônica tradicional usada nos roteadores no núcleo da rede pode ser tornar um limitante para o crescimento da internet [1], [2]. Isto acontece não somente por causa da necessidade de altas taxas de transmissão, as quais podem ser inviáveis de serem realizadas pela eletrônica; mas também por causa do significativo consumo de energia que este roteadores podem empregar [1]. Redes Ópticas Transparentes (TON – *Transparent Optical Networks*) usando Multiplexagem por Divisão em Comprimento de Onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*) tem sido encarado com uma estratégia interessante para resolver ambos os problemas [3], [4].

Todavia, apesar de todo o avanço alcançado nestes últimos anos, ainda existem desafios a serem vencidos para a implementação em massa de TON's e consequentemente o uso eficiente dos recursos destas redes [5]. Desenvolvimento

e testes experimentais de dispositivos de redes totalmente ópticos, distribuição do tráfego na rede, tecnologia de chaveamento óptico e projeto de uma nova arquitetura de rede são os principais desafios [2].

Distribuição do tráfego na rede tem relação direta com o projeto/desenvolvimento de eficientes os algoritmos de Alocação de Rota e de Comprimento de Onda utilizados pelo Sistema de Gerenciamento de Rede (NMS – *Network Management System*) para melhorar a alocação dos recursos na rede [6]. Recentemente, algoritmos RWA mais sofisticados, denominados RWA conscientes de limitações da camada física (IA-RWA – *Impairments Aware RWA*), que levam em conta os efeitos da camada física têm sido estudados [7] – [17]. Em [7] – [10] a influência do Ruído de Emissão Espontânea (ASE – *Amplified-Spontaneous Emission*) de amplificadores ópticos sobre a Taxa de Erro de Bit (BER – *Bit Error Rate*) em uma TON foi investigada. Estratégias para minimizar o impacto de efeitos não-lineares, como Mistura de Quatro Ondas e Modulação (FWM – *Four-wave Mixing*) de Fase Cruzada (XPM – *Cross Phase Modulation*), sobre a qualidade de serviço óptica (OQoS – *Optical Quality of Service*) em uma TON, foram apresentadas em [11] – [14]. Em [15] – [16] foi averiguado o impacto do efeito de Dispersão de Modo de Polarização (PMD – *Polarization Mode Dispersion*).

Embora, de forma geral, IA-RWA's visem o desenvolvimento de estratégias de roteamento e alocação de roteamento que minimizem o impacto dos efeitos da camada física sob a OQoS de conexões em uma TON; a maioria destes trabalhos focou no desenvolvimento de modelos para os efeitos da camada física que tornasse possível a inclusão destes efeitos nos algoritmos RWA's. Com isso, de um lado os IA-RWA's proporcionam a melhora na qualidade das conexões, mas de outro lado ocorre prejuízo no desempenho destes algoritmos por causa de bloqueio de conexões que não atendem aos requisitos de OQoS exigidos pelas requisições de conexões das TON [17] – [18].

O objetivo deste trabalho é apontar que o uso de estratégias simples de roteamento pode melhorar sensivelmente o desempenho dos algoritmos IA-RWA's. Para isso é apresentada uma estratégia de roteamento baseada no algoritmo de Yen que é testada em uma TON sobre a influência do efeito de PMD, que é um efeito inerente à escolha da rota pelos IA-RWA's. Pode-se dividir os efeitos da camada física, sob o ponto de vista de sua influência sobre as conexões em uma TON, em duas categorias: (i) os efeitos

¹ Alexsandra F. Gomes, Carlos E. M. Fernandes, Victor A. P. Oliveira e Iguatemi E. Fonseca, Departamento de Ciências Exatas e Naturais, Ufersa, RN, Brasil, Tel. +55-84-3315-1779, Email: alexsandraf@gmail.com, iguatemi@ufersa.edu.br, www.ufersa.edu.br/mcc.

inerentes à escolha da rota pelo IA-RWA, como por exemplo PMD e ASE; (ii) os efeitos inerentes à escolha do comprimento de onda, como por exemplo os efeitos não-lineares (XPM, FWM, etc) e saturação dos amplificadores. Sabe-se que efeitos inerentes à escolha da rota, como o PMD, também dependem do comprimento de onda (PMD de segunda ordem), mas a grande parte da penalidade causada pelo PMD sobre as conexões é devido à escolha da rota (PMD de primeira ordem).

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção II a PMD e os parâmetros que podem impactar em uma TON são apresentados. A Seção III mostra a proposta de um algoritmo IA-RWA com uma estratégia de roteamento baseada no algoritmo de Yen. Na seção IV são discutidos os resultados das simulações numéricas e a Seção V traz as conclusões e proposta de trabalhos futuros.

II. DISPERSÃO DE MODO DE POLARIZAÇÃO

A energia do sinal óptico em um dado comprimento de onda se propagando por uma fibra óptica é dividida em dois modos de polarização, que devido às características da fibra, viajam com velocidades de propagação ligeiramente diferentes entre si. Além disso, fatores externos como mudanças de temperatura do ambiente e tensão do cabo durante a instalação, também fazem com que a distribuição da energia do sinal nos modos de propagação varie suavemente com o tempo [6]. Esse fenômeno se traduz em um efeito dispersivo na fibra, chamado de Dispersão de Modo de Polarização (PMD) e causa uma penalidade de potência nos sinais que se propagam pela fibra.

O atraso médio diferencial entre os dois modos de polarização em um enlace com comprimento L km pode ser calculado por [19] – [20]

$$\Delta t = D_{PMD} \sqrt{L}. \quad (1)$$

Em que: Δt é o atraso diferencial de grupo (DGD – *Differential Group Delay*), dado em ps, e D_{PMD} é o parâmetro de PMD da fibra óptica, o qual é fornecido pelo fabricante e dado em ps/\sqrt{km} . Este parâmetro indica o quanto uma fibra é sensível ao efeito de PMD.

A degradação causada por esse efeito pode ser comparada com o da dispersão cromática, cujo fenômeno é relativamente estável. Em contrapartida, a PMD de fibras ópticas monomodo em qualquer comprimento de onda do sinal é instável, variando aleatoriamente, sendo comumente modelado como uma variável aleatória com distribuição de probabilidade Maxwelliana [6].

A norma ITU G.691 - *Optical interfaces for single channel STM-64, STM-256 and other SDH systems with optical amplifiers* - define que 1dB deve ser a penalidade máxima da degradação do sinal óptico para que uma determinada rota tenha uma transmissão considerada de qualidade. A penalidade, em dB, ocasionada pelo PMD em uma fibra pode ser estimada por [19] – [20]

$$Penalidade (dB) \cong 26. \left[\frac{(\Delta t)^2}{T^2} \right]. \gamma (1 - \gamma). \quad (2)$$

em que: T é o período ou tempo de *bit*, dado por $T = \frac{1}{B}$, B é a taxa de transmissão, dada em bps, e γ é a fração da potência lançada em cada modo de polarização.

III. ALGORITMO RWA PROPOSTO

A. Algoritmo RWA-distância

Algoritmos RWA tradicionais bloqueiam requisições em redes dinâmicas baseados somente na restrição de continuidade de comprimento de onda [21]. Da mesma forma, o algoritmo RWA-distância implementado neste trabalho também bloqueia requisições somente baseado na restrição de continuidade de comprimento de onda. Para o processo de escolha da rota, o algoritmo de Yen é utilizado para encontrar as k -ésimas melhores rotas [22], onde o comprimento em km de um dado enlace (ou, a distância entre dois nós vizinhos quaisquer da rede) é definido como o seu custo. O algoritmo RWA-distância usa como estratégia de alocação de comprimento de onda o algoritmo First-Fit [23] – [24].

Note que nenhuma limitação da camada física é levada em conta no processo de admissão de conexões, portanto no âmbito deste trabalho os algoritmos RWA-distância poderiam também ser denominados de PMD-Cegos [25].

B. Algoritmo RWA-PMD

1. Descrição do algoritmo

O Algoritmo RWA-PMD proposto neste trabalho avalia a probabilidade de bloqueio das conexões, não só quanto à disponibilidade ou não de rota e comprimento de onda, como também mediante uma métrica de QoS pré-estabelecida. Como o objetivo do trabalho é estudar o impacto de estratégias de roteamento sobre o desempenho da rede, o efeito de PMD, que é um efeito inerente à escolha da rota na rede, foi avaliado e escolhido como métrica de QoS.

A Figura 1 apresenta o fluxograma do algoritmo proposto neste trabalho. Como pode ser visto, depois de gerada a requisição da conexão, de acordo com o estado atual da rede, o que configura um roteamento adaptativo [18], o algoritmo *de Yen* procura dentre todas as possibilidades as k -ésimas melhores rotas entre a origem e o destino. O custo de cada enlace da rede foi definido de acordo com (1) e (2). Após a execução do algoritmo de roteamento, elege-se portanto, dentre o conjunto total de rotas na rede, um subconjunto contendo as k rotas com menor penalidade imposta pelo PMD. Dentre o subconjunto das k melhores rotas, o critério de QoS óptico é testado e as rotas que atendem a este critério são escolhidas como rotas candidatas à alocação. A disponibilidade comprimento de onda nas rotas candidatas é testada a seguir usando-se o algoritmo *First-fit* e então se decide pela admissão ou bloqueio da conexão.

Enfim, perceba que, da forma que foi implementado o algoritmo RWA-PMD, no caso da rota de menor custo já estar em uso, com todos os comprimentos de onda ocupados ou mesmo não atendendo o QoS exigido, é possível que a segunda ou terceira melhor rota seja utilizada para estabelecer a conexão e dessa forma obter um melhor desempenho da rede.

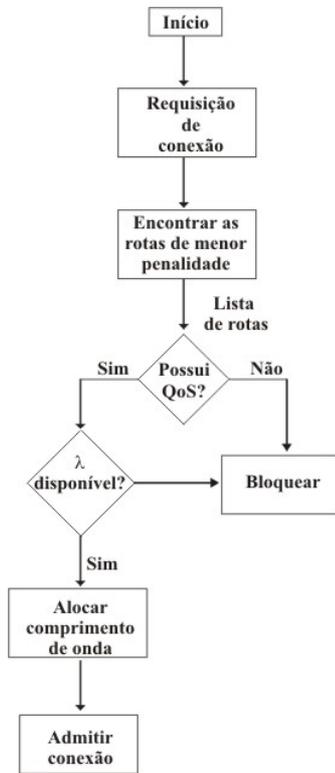


Fig. 1: Fluxograma do algoritmo RWA-PMD

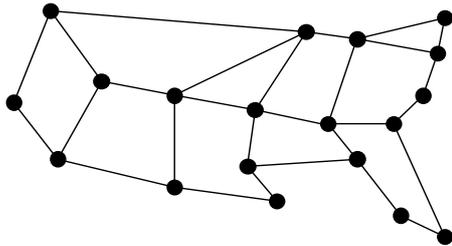


Fig. 2: Rede utilizada nas simulações

2. Ambiente de Simulação

Através de um ambiente de simulação estruturado, utilizando a linguagem de programação C, foi simulado um cenário dinâmico, no qual foram geradas 100000 requisições de conexões que possuem um padrão de tráfego uniforme entre os nós da rede e seguem uma distribuição poissoniana tendo duração com distribuição exponencial (média = 1s). A Rede Óptica utilizada é transparente, ou seja não possui conversão óptica-elétrica-óptica, e possui 19 nós, com todos os enlaces bidirecionais. Amplificadores ópticos ideais para compensar as perdas dos L km de fibra conectando dois nós

adjacentes são aplicados, sendo que L varia entre 100 e 220 km. São usados um conjunto de $W=12$ comprimentos de onda em uma rede óptica sem conversão de comprimento de onda. A topologia da rede simulada é ilustrada na Figura 2.

Para avaliar o impacto do efeito de PMD de forma mais completa possível na rede, foram feitas simulações numéricas para as taxas de transmissão de 2,5, 10 e 40 Gbps. Foi considerado também três modalidades de fibra óptica para os enlaces, de acordo com o componente D_{PMD} , onde fibras mais antigas possuem o valor desse coeficiente mais alto e as de fabricação mais recente mais baixo, demonstrando uma menor influência do PMD [6]. Dessa forma, foi considerado o valor de $D_{PMD} = 0,2 ps/\sqrt{km}$ para as fibras de fabricação mais recente e $D_{PMD} = 1,8 ps/\sqrt{km}$ para as de fabricação mais antigas. No caso de enlaces mistos, igualmente utilizados, o simulador atribui $D_{PMD} = 0,2 ps/\sqrt{km}$ para 50% dos enlaces da rede e $D_{PMD} = 1,8 ps/\sqrt{km}$ para a outra metade. Requisições de conexões na rede que possuem penalidade devido ao PMD maior que 1 dB são bloqueadas por não atender ao critério de QoS exigido na rede.

A partir desses parâmetros, a quantidade de conexões rejeitadas dentre o número total de pedidos de conexões que chegam na rede óptica é a Probabilidade de Bloqueio da rede.

IV. RESULTADOS

A. Impacto do efeito de PMD

Com um enorme volume de informações geradas a partir dos experimentos, foi possível demonstrar o comportamento da rede diante do critério de qualidade de serviço estabelecido. Foram identificados claramente quais fatores imprescindíveis para que, no que diz respeito a limitações impostas pelo PMD na rede, uma estratégia simples de roteamento pode melhorar sensivelmente o desempenho da rede.

A Figura 3 mostra a probabilidade de bloqueio para os algoritmos RWA-PMD e RWA-distância para uma rede com fibras mistas e operando a taxa de transmissão de 2,5 Gbps. Como esperado, é possível verificar que quando se considera apenas a distância entre origem e destino como custo para o cálculo da rota, ou seja quando a rede opera com o algoritmo RWA-distância, o bloqueio é menor. Já considerando o PMD, percebe-se que mesmo com pouco tráfego na rede há uma resposta de probabilidade de bloqueio, que se deve justamente ao não atendimento do QoS estipulado (penalidade < 1dB), o que é diretamente proporcional ao aumento do tráfego. Perceba também que quando o algoritmo RWA-PMD opera com uma rota alternativa, ou seja com $k=2$, a probabilidade de bloqueio apresenta uma melhora da ordem de 25% para tráfego alto e médio.

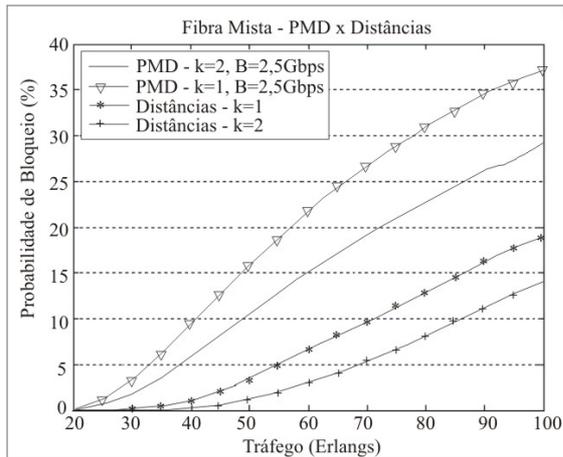


Fig. 3: Prob. de bloqueio x Tráfego em Er. Rede com fibras mista.

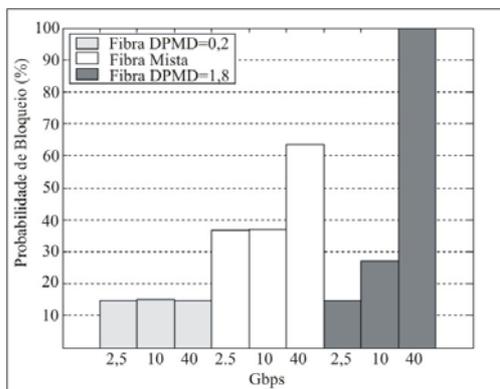


Fig. 4. Probabilidade de bloqueio considerando o tráfego de 100 Erlangs, para RWA-PMD com k=1.

Uma das principais observações que também pôde ser extraída diante das simulações, foi quanto à utilização de fibras de fabricação mais recente e que por isso, têm uma menor sensibilidade aos efeitos do PMD. Há uma diferença considerável na probabilidade de bloqueio, levando os índices de bloqueio a menos de 20% em redes com fibras que foram fabricadas com a preocupação de melhorar esse tipo de degradação do sinal óptico, independentemente da taxa de transmissão. Isto pode ser visualizado na Figura 4, que mostra os índices de bloqueio para um tráfego de 100 Erlangs.

Como pode ser visto na Figuras 5, 6 e 7, para uma baixa taxa de transmissão (2,5 Gbps), as redes que possuem fibras homogêneas, ou seja, todos os enlaces tendo o mesmo DPMD, tem um melhor desempenho, até 19% de bloqueio (ver Figuras 5 e 6). Enquanto a rede com fibra mista pode ter a probabilidade de bloqueio chegando até 38% com a mesma taxa (ver Figura 7). Para uma taxa de transmissão de 10 Gbps, as fibras mistas ainda possuem as maiores probabilidades de bloqueio (também em torno de 38%) quando se trata do tráfego de 100 Erlangs, porém as fibras mais sensíveis ao efeito do PMD possuem uma probabilidade de bloqueio na casa dos 27% mesmo quando o tráfego é de apenas 20 Erlangs (ver Figura 7). Provavelmente, isto se deve a composição das rotas com enlaces com fibras com alto e baixo valores de D_{PMD} .

B. Impacto da Estratégia de Roteamento

A idéia principal deste trabalho é mostrar que o uso de uma estratégia simples de roteamento pode melhorar sensivelmente o desempenho de redes ópticas impactadas por um efeito inerente ao roteamento, como por exemplo o PMD. Como pode ser visto nas Figuras 5, 6 e 7, o uso de uma rota alternativa na rede melhora o seu desempenho em cerca de 45% para redes com fibras ópticas com $D_{PMD} = 0,2 ps/\sqrt{km}$ (Figura 5); cerca de 40% para redes com fibras com $D_{PMD} = 1,8 ps/\sqrt{km}$ operando na taxa de 2,5 Gbps e cerca de 15% na taxa de 10 Gbps (Figura 6); e em torno de 15% para redes com fibras mistas operando nas taxas de 2,5 e 10 Gbps.

A exceção acontece para os casos onde a rede opera a altas taxa de transmissão, como por exemplo 40 Gbps. Neste caso, praticamente não existe melhora no desempenho da rede, o que está de acordo com (2), já que a penalidade introduzida pelo PMD cresce com o quadrado da taxa de transmissão.

Por fim, foi analisado o impacto do incremento do número de rotas alternativas utilizadas pelo algoritmo RWA-PMD. Como apresentado na Figura 8, foi observado que há uma pequena melhora para este cenário simulado quando se usa cinco rotas alternativas ($k = 5$). Isto pode significar que o custo-benefício computacional para se buscar mais rotas alternativas pode não ser interessante.

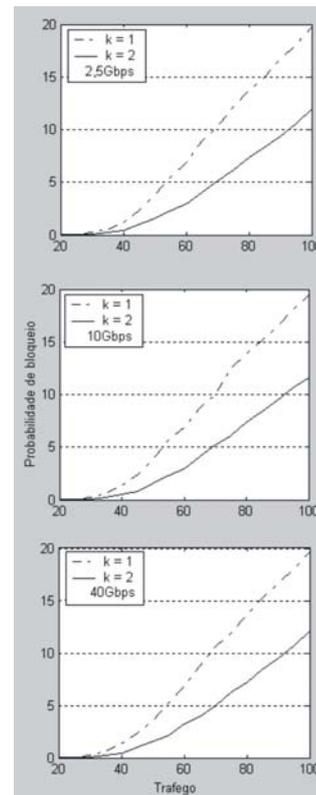


Fig. 5. Comparação da probabilidade de bloqueio para rede com fibra de $D_{PMD}=0,2$, em taxas de transmissão de 2,5, 10 e 40 Gbps, respectivamente. Utilizando-se o algoritmo RWA-PMD com 1 ou 2 rotas.

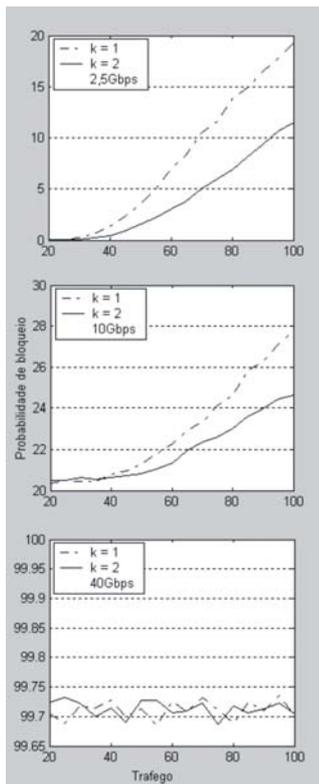


Fig. 6. Comparação da probabilidade de bloqueio para fibra de $D_{PMD}=1,8$, em taxas de transmissão de 2,5, 10 e 40 Gbps, respetivamente. Utilizando-se o algoritmo RWA-PMD com 1 ou 2 rotas.

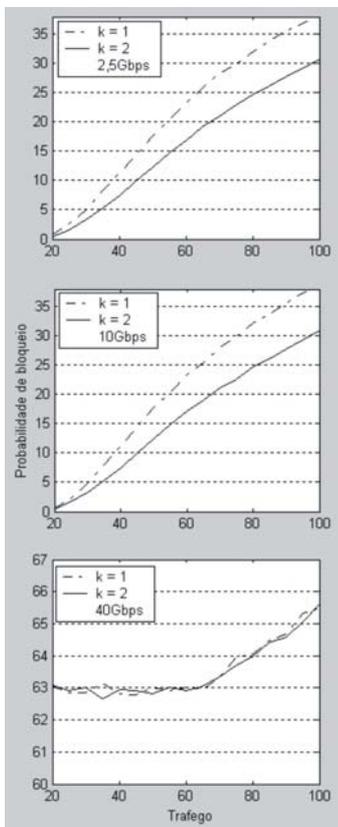


Fig. 7: Comparação da probabilidade de bloqueio para fibra de D_{PMD} misto, em taxas de transmissão de 2,5, 10 e 40 Gbps, respetivamente. Utilizando-se 1 ou 2 rotas.

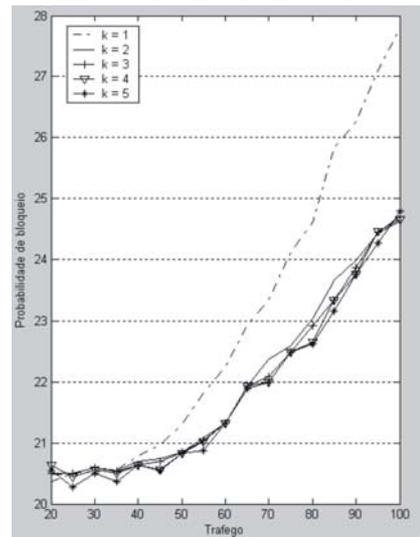


Fig. 8: Probabilidade de Bloqueio para fibra de $D_{PMD} = 1.8$ numa taxa de transmissão de 10 Gbps, para de 1 a 5 melhores rotas.

V. CONCLUSÕES

A PMD pode trazer sérios problemas no que diz respeito a QoS na transmissão através de redes ópticas, porém esses transtornos podem ser melhorados através de algumas alternativas que verificamos através dos experimentos desse trabalho.

Como o efeito causado por esse fator degradante é muito pior em fibras que possuem um maior componente D_{PMD} , principalmente em altas taxas de transmissão, uma boa alternativa, que será explorada em um trabalho futuro, é buscar desenvolver um algoritmo de roteamento que busque dentro das possibilidades existentes, um caminho que possua a maior quantidade possível de enlaces que sejam implementados com fibras mais recentes, melhorando assim o desempenho da rede.

No caso das redes que possuem fibras com D_{PMD} mais alto, uma maneira para melhorar de forma relevante a probabilidade de bloqueio das conexões é utilizar um tipo roteamento que faça uso de uma ou mais rotas alternativas e assim assegurar maior número de requisições de conexão atendidas.

Finalmente, é importante lembrar que existem inúmeros outros efeitos que comprometem a qualidade do sinal óptico no decorrer da rota, o que também torna uma proposta de continuidade deste estudo, injetar outros efeitos simultaneamente com o PMD e com isso fazer um estudo mais amplo e aprofundado, encontrando mais fatores variantes para qualidade do sinal e alternativas para definir a melhor estratégia de roteamento para a transmissão através desse meio.

REFERÊNCIAS

- [1] H. Harai, "Optical Packet & Path Integration for Energy Savings toward New Generation Network", in *Proc. IEEE SAINT 2008*, pp. 389 – 392, August 2008.
- [2] M. L. F. Abbade, J. D. Marconi, R. L. Cassiolato, V. Ishizuca, I. E. Fonseca, and H. L. Fragnito, "Field-Trial Evaluation of Cross-Layer Effect Caused by All-Optical Wavelength Converters on IP Network Applications", aceito para o *IEEE/OSA J. Lighthwave Technology* que será publicado em junho/2009.
- [3] I. Tomkos, S. Azodolmolky, D. Klonidis, M. Aggelou, M. Margariti, "Dynamic impairment aware networking for transparent mesh optical networks: Activities of EU project DICONET", in *Proc. 10th IEEE ICTON 2008*, pp. 6 – 12, June 2008.
- [4] M. Yuang, I. Chao, Bird Lo, P. Tien, W. J. Chen, Yu-min Lin, S. S. W. Lee, and Ching-yun Chien, "HOPSMAN: An Experimental Testbed System for a 10-Gb/s Optical Packet-Switched WDM Metro Ring Network", *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, pp. 158 – 166, July 2008.
- [5] R. Ramaswami, "Optical Networking Technologies: What Worked and What Didn't", *IEEE Communications Magazine*, pp. 132 – 139, Sept. 2006.
- [6] R. Ramaswami, K.N. Sivarajan, "Optical networks: a practical perspective", Academic Press, 2002.
- [7] B. Ramamurthy, et al., "Impact of transmission impairments on the teletraffic performance of wavelength-routed optical networks," *IEEE/OSA J. Lighthwave Technology*, vol. 10, pp. 1713-1723, Oct. 1999.
- [8] J. F. Martins-Filho, C. J. A. Bastos-Filho, E. A. J. Arantes, S. C. Oliveira, L. D. Coelho, J. P. G. Oliveira, R. G. Dante, E. Fontana, F. D. Nunes, "Novel Routing Algorithm for Transparent Optical Networks Based on Noise Figure and Amplifier", in *Proc. IEEE IMOC2003*, Sept 2003.
- [9] T. Deng, S. Subramaniam, "Source Power Management in Transparent Wavelength-Routed Mesh Networks", in *Proc. IEEE ICC'04*, Jun 2004.
- [10] M. A. C. Lima, A.F.R. Araújo, A.C César, "Agregação Dinâmica de Tráfego em Redes Ópticas WDM Utilizando Algoritmo Genético", in *Proc. MOMAG'04*, Aug 2004.
- [11] I. E. Fonseca, M. R. N. Ribeiro, R. C. Almeida Jr., and H. Waldman, "Preserving Global Optical QoS in FWM Impaired Dynamic Networks", *IEE Electronics Letters*, Vol. 40, pp. 191-192, Feb 2004.
- [12] I. E. Fonseca, M. R. N. Ribeiro, R. C. Almeida Jr., and H. Waldman, "Meeting Optical QoS in Dynamic Networks with Reduced Complexity", in *Proc. IEEE ECOC'04*, Sept 2004.
- [13] Raul C. Almeida Jr., Divanilson R. Campelo, Adolfo V. T. Cartaxo, Kenneth M. Guild, and Helio Waldman, "Efficient Wavelength Assignment Policy for XPM-Impaired WDM Networks", *IEEE Communication Letters*, vol. 12, pp. 791 – 793, Oct. 2008.
- [14] U. S. P. Filho, M. R. N. Ribeiro, C. P. Maioli, M. Freitas, and I. E. Fonseca, "Cost functions for cac/rwa in dynamic optical networks under gvd, spm and xpm", *Journal of Microwave and Optoelectronics*, vol. 6, pp. 249–262, jun. 2007.
- [15] P. Kulkarni, et al., "Benefits of Q-factor based routing in WDM metro networks," in *Proc. ECOC 2005*, Glasgow, U.K., Sept. 2005.
- [16] M. Ali, L. Tancevski, "Impact of Polarization-Mode Dispersion on the Design of Wavelength-Routed Networks", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 14, pp. 720-722, May 2002.
- [17] R. Martinez, C. Pinart, J. Comellas, G. Junyent, "Routing Issues in Transparent Optical Networks", in *Proc. IEEE ICTON 2006*, Jun 2006.
- [18] B. Mukherjee, "Optical WDM Networks", Springer – optical networks series, 2006.
- [19] C. D. Poole, R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy, and D. A. Fishman, "Fading in Lightwave Systems Due to Polarization-Mode Dispersion", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 3, pp. 68-70, May 1991.
- [20] X. Liu, C. Xie, and A. J. van Wijngaarden, "Multichannel PMD Mitigation and Outage Reduction Through FEC With Sub-Burst-Error-Correction Period PMD Scrambling", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 16, pp. 2183-2185, Sept. 2004.
- [21] R. Ramaswami, K.N Sivarajan, "Routing and Wavelength Assignment in All-optical Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 3, Oct 1995.
- [22] J. Yen, "Finding the k shortest loopless paths in a network", *Management Science*, vol. 17, pp. 712–716, July 1971.
- [23] I. Chlamtac, A. Ganz, G. Karmi, "Lightpath communication: na approach to high bandwidth optical WAN's", *IEEE/ACM Transactions on Communications*, Vol. 40, 1992.
- [24] H. Zang, J. P. Jue, and B. Mukherjee, "A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks", *SPIE Optical Network Magazine*, Vol. 1, pp. 47-60, Dec 2000.
- [25] I. E. Fonseca, "Uma abordagem para Aprovisionamento e Diferenciação de QoS Óptico na Presença de FWM em Redes Ópticas Transparentes", Tese de Doutorado, FEEC/Unicamp, Abril 2005.