

## Alocação de Comprimento de Onda em Redes Ópticas Considerando as Degradações de Camada Física

José Maranhão<sup>1</sup>, André Soares<sup>2</sup>, Hélio Waldman<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP  
Campinas – SP – Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal do Piauí – UFPI  
Teresina – Piauí - Brasil

<sup>3</sup>Universidade Federal do ABC – UFABC  
Santo André - SP – Brasil

j3maranhao@gmail.com

**Abstract.** *Several studies on the routing and wavelength assignment (RWA) problem have already incorporated the physical layer impairments in order to find the appropriate resources for establishing the lightpath. This approach has become known in the literature as impairment aware RWA (IA-RWA). Although it is a more realistic approach compared to the RWA, the conventional IA-RWA approach usually neglects the degradation caused by the establishment of a new lightpath in the others already established in the network. In this paper we adopted an IA-RWA approach that takes into account these degradations. From the perspective of this new approach, we conducted a performance evaluation study comparing some wavelength assignment algorithms known in the literature and a new algorithm proposed in this paper. Simulation results show that our algorithm outperforms all others evaluated.*

**Resumo.** *Vários trabalhos encontrados na literatura abordam o problema de roteamento e alocação de comprimento de onda considerando as degradações de camada física para a escolha de um recurso apropriado para o estabelecimento de conexões. Esta abordagem ficou conhecida na literatura como RWA-IA. Embora seja uma abordagem mais realista se comparada à abordagem RWA, a abordagem RWA-IA convencional não considera as degradações ocasionadas pelo estabelecimento de novas conexões nas demais já estabelecidas na rede. Neste artigo é proposta uma nova abordagem RWA-IA, onde estas degradações são levadas em consideração. Sob a perspectiva desta nova abordagem, é realizado um estudo de avaliação de desempenho comparando algoritmos de alocação de comprimento de onda conhecidos na literatura e um novo algoritmo proposto neste trabalho. Resultados obtidos através de simulações comprovam o melhor desempenho do algoritmo proposto em relação aos demais avaliados.*

## 1. Introdução

As redes de transmissão de dados ao redor do mundo estão em plena expansão para atender a crescente demanda por largura de banda das redes de acesso. Novas aplicações para transmissão de vídeo em alta resolução, transferência de grandes arquivos em redes P2P e ambientes de vídeo conferência impulsionam a demanda por taxas de transmissão cada vez maiores nas redes de acesso. Outro fator que contribui para a necessidade de expansão da capacidade das redes de transmissão são as novas gerações de redes celulares. Tecnologias 3G e 4G viabilizam uma gama de aplicativos para dispositivos móveis que consomem uma enorme banda. Para atender esta crescente demanda por largura de banda, as redes de *backbone* precisam ser ampliadas e modernizadas.

As redes ópticas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) compõem a grande maioria das redes de *backbone* da atualidade. Nestas redes de transporte, os dados são transmitidos através de diversos comprimentos de onda multiplexados em uma única fibra óptica, resultando em uma melhor utilização da sua enorme capacidade de transmissão [Murthy and Gurusamy, 2002]. Para o estabelecimento de uma comunicação entre um par de nós de uma rede óptica WDM é necessário construir um caminho óptico fim-a-fim. Cada caminho óptico utiliza uma rota e um comprimento de onda. O problema da escolha de uma rota e um comprimento de onda adequado para cada caminho óptico é conhecido como RWA - *Routing and Wavelength Assignment* [Zang et al., 2000]. Os algoritmos de RWA têm por objetivo minimizar a probabilidade de bloqueio de novas conexões em uma rede óptica transparente.

O estabelecimento de um caminho óptico se confirma mediante a reserva de um comprimento de onda disponível. O comprimento de onda pode diferir, ou não, ao longo dos enlaces da rota em função da capacidade de conversão de comprimento de onda dos comutadores ópticos [Soares et al., 2008]. Na ausência de conversores de comprimento de onda disponíveis, a propriedade de continuidade de comprimento de onda precisa ser respeitada ao longo de todos os enlaces do caminho óptico.

Vários trabalhos encontrados na literatura abordam o problema RWA considerando a camada óptica um meio ideal de transmissão e, portanto, qualquer escolha de rota e comprimento de onda é considerada válida do ponto de vista de desempenho da camada óptica [Zang et al., 2000].

Na prática, o sinal óptico sofre degradações ao se propagar através de enlaces de fibra óptica, matrizes de comutação, amplificadores ópticos e outros elementos. Com o acúmulo destas degradações ao longo da rota, a taxa de erro de bit (BER – Bit Error Rate) no receptor se torna cada vez maior e pode atingir níveis intoleráveis [Ramamurthy et al., 1999], [Pereira et al., 2007]. Requisitos como sensibilidade, OSNR – *Optical Signal Noise Ratio*, Dispersão Cromática e PMD – *Polarization Mode Dispersion* devem ser atendidos para que a taxa de erro de bit seja mantida em níveis aceitáveis.

Em [Ramamurthy et al., 1999], foi investigado pela primeira vez o desempenho dos algoritmos RWA em redes ópticas modeladas com degradações de camada física. Os resultados foram conclusivos. Os algoritmos não estavam preparados para lidar com as degradações, e de uma forma geral, o desempenho foi bastante prejudicado com a nova abordagem. Além de avaliar a disponibilidade de rotas e comprimentos de onda, ficou evidente a necessidade dos algoritmos de RWA considerarem as degradações de

camada física para a escolha de um recurso apropriado para o estabelecimento de conexões.

Para suprir esta limitação dos algoritmos RWA, foram concebidos os algoritmos RWA-IA (*Routing and Wavelength Assignment – Impairments Aware*). O objetivo destes algoritmos consiste em encontrar uma rota e um comprimento de onda para o estabelecimento de uma conexão óptica levando em consideração as degradações da camada física [Azodolmolky et al., 2009].

Na abordagem convencional do problema RWA-IA, o estabelecimento de um caminho óptico se confirma mediante a reserva de uma rota e um comprimento de onda disponível e em condições adequadas em termos de degradação da camada física. Embora seja uma abordagem mais realista se comparada à abordagem RWA, a abordagem RWA-IA convencional não considera as degradações ocasionadas pelo estabelecimento de um novo caminho óptico nos demais já estabelecidos na rede. Neste artigo é proposta uma nova abordagem RWA-IA, onde estas degradações de camada física são levadas em consideração. Sob a perspectiva desta nova abordagem, é realizado um estudo de avaliação de desempenho comparando algoritmos de alocação de comprimento de onda conhecidos na literatura e um novo algoritmo proposto neste trabalho.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: na Seção 2, são apresentados os trabalhos relacionados e destacadas as principais contribuições deste artigo. Na Seção 3, uma discussão é feita a respeito das degradações de camada física consideradas neste trabalho. Na Seção 4 são apresentados os algoritmos de alocação de comprimento de onda avaliados. Ainda na Seção 4, é apresentado o algoritmo *Crosstalk Interference Avoidance* proposto neste trabalho. Em seguida, na Seção 5 os resultados de simulação são analisados. Por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões.

## 2. Trabalhos Relacionados e Contribuições

Os fluxogramas apresentados na Figura 1 descrevem as etapas seguidas para o estabelecimento de caminhos ópticos em distintas abordagens do problema RWA. A maioria dos trabalhos sobre RWA encontrados na literatura assumem a abordagem RWA convencional [Zang et al., 2000]. Segundo a abordagem RWA convencional, após a chegada de uma requisição para o estabelecimento de um caminho óptico, um algoritmo de roteamento será responsável por definir a rota por qual o caminho óptico será estabelecido. Em seguida, um algoritmo de alocação de comprimento de onda deverá selecionar um comprimento de onda disponível. Caso nenhum comprimento de onda esteja disponível, a requisição será bloqueada.

Segundo a abordagem RWA-IA convencional, após a escolha do comprimento de onda, é feita uma análise para verificar se o caminho óptico possui condições adequadas em termos de degradação de camada física para ser estabelecido. Caso o limiar de degradação não seja atendido, a requisição é bloqueada. Para evitar os bloqueios por condições inadequadas de camada física, os algoritmos de alocação de comprimento de onda devem aplicar alguma estratégia para evitar a escolha de recursos que embora disponíveis, não atendam os requisitos de camada física. Diversos algoritmos de alocação de comprimento de onda sensíveis às degradações de camada física foram propostos na literatura [Pointurier et al., 2007], [Pereira et al., 2007], [He and Brandt-Pearce, 2006].

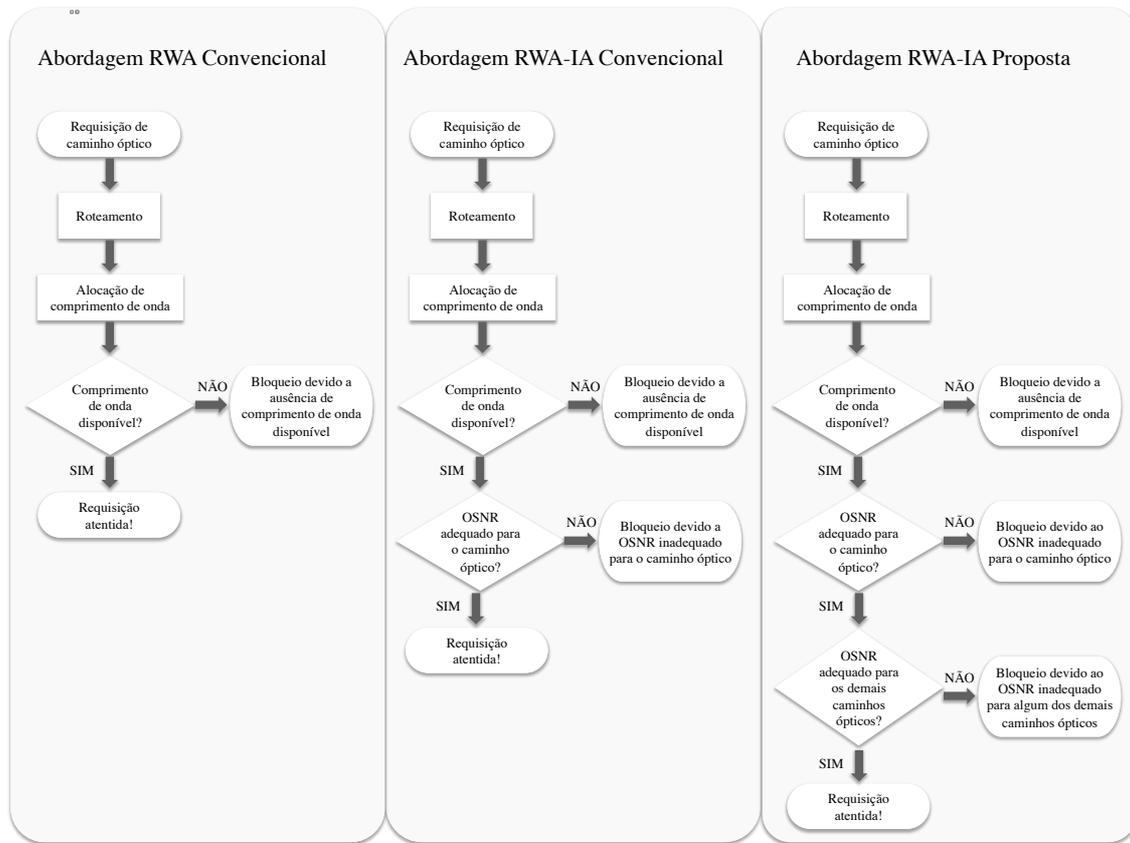


Figura 1. Distintas abordagens ao problema RWA.

Na abordagem RWA-IA adotada neste trabalho, um novo caminho óptico é estabelecido se, e somente se, as seguintes premissas sejam atendidas:

- Haver disponibilidade de rota e comprimento de onda;
- Limiar de degradação na camada física deve ser atendido para o novo caminho óptico;
- Assumindo que o novo caminho óptico seja atendido, o limiar de degradação para todos os demais caminhos ópticos já ativos na rede deve ser atendido.

Desta forma, garantimos que enquanto os caminhos ópticos estejam ativos na rede, eles permanecem com um limiar mínimo de degradação, o suficiente para manter a taxa de erro de bit em níveis aceitáveis.

As requisições para o estabelecimento de novos caminhos óptico podem ser bloqueadas por três distintas razões: **ausência de comprimento de onda disponível**, **OSNR inadequado para o novo caminho óptico** ou **OSNR inadequado para algum dos demais caminhos ópticos já ativos na rede**. Neste trabalho utilizaremos as siglas **ACO**, **OIN** e **OID** para representar os três tipos de bloqueio, respectivamente.

Em [Deng et al., 2004], uma abordagem similar à proposta neste trabalho foi adotada. Neste trabalho, os autores também levaram em consideração as degradações ocasionadas pelo estabelecimento de novos caminhos ópticos nos demais já estabelecidos na rede. No entanto, os autores consideraram apenas dois tipos de bloqueios. O primeiro devido a ausência de comprimento de onda disponível e o

segundo devido ao limiar de degradação na camada física não ser atendido. No entanto, com esta abordagem não é possível distinguir se o limiar de degradação não foi atendido para o novo caminho óptico ou se, caso o caminho óptico fosse atendido, o limiar de degradação de algum dos demais já ativos na rede seria afetado.

Segundo o nosso conhecimento, nenhum estudo de avaliação de desempenho de algoritmos RWA investigou o impacto dos bloqueios OID no desempenho das redes ópticas WDM. Além disso, nenhum algoritmo de alocação de comprimento de onda proposto na literatura procura reduzir estes bloqueios.

Este trabalho apresenta três principais contribuições:

- Apresentar uma nova abordagem ao problema RWA-IA que considera as degradações ocasionadas pelo estabelecimento de um novo caminho óptico nos demais já estabelecidos na rede.
- Avaliar o impacto dos bloqueios OID no desempenho das redes ópticas WDM em algoritmos de alocação de comprimento de onda encontrados na literatura.
- Propor um novo algoritmo de alocação de comprimento de onda que procure otimizar o desempenho da rede levando em consideração os três tipos de bloqueio.

### 3. Degradações da Camada Física

Para tornar possível a comunicação entre nós em uma rede óptica WDM, alguns elementos precisam ser empregados. A Figura 2 apresenta os elementos considerados neste trabalho para compor as rotas de comunicação.

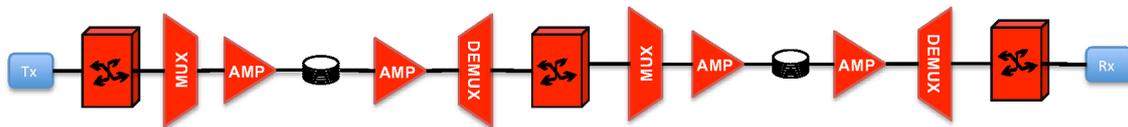


Figura 2. Elementos envolvidos em uma rota de comunicação.

Um caminho óptico é originado em um transmissor do nó de origem e finalizado em um receptor no nó destino. Matrizes de comutação são empregadas para encaminhar os caminhos ópticos ao destino correto. Elementos Mux/Demux são utilizados para multiplexar e demultiplexar os comprimentos de onda transportados nas fibras ópticas. Por fim, amplificadores EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) foram utilizados para ajudar a compensar as atenuações inseridas pelos demais elementos da rota.

À medida em que o sinal óptico se propaga ao longo da rede, podem ocorrer severas degradações na camada física. Neste trabalho, foram modeladas as seguintes degradações: ruído ASE originado nos amplificadores EDFA [Oliveira, 2007], *co-wavelength crosstalk* originado nas matrizes de comutação, *self-wavelength crosstalk* e *neighbor crosstalk* originado devido às imperfeições dos elementos DEMUX, e as atenuações originadas nos elementos de MUX/DEMUX, matrizes de comutação e na fibra óptica. A modelagem dos efeitos de *crosstalk* foi baseada no trabalho [Deng et al., 2004].

Utilizamos o parâmetro OSNR para avaliar a qualidade do sinal óptico. Os receptores ópticos possuem uma curva de desempenho que relaciona o OSNR

diretamente com uma taxa de erro de bit, e portanto, a OSNR pode ser usada como critério de QoS de camada física de um caminho óptico.

Neste trabalho não consideramos o efeito PMD na degradação do sinal óptico. Embora seja um efeito crítico para sistemas ópticos de longa distância em taxas superiores a 10Gbps, acreditamos que este efeito deva ser considerado pelo algoritmo de roteamento, e foco deste trabalho está nos algoritmos de alocação de comprimento de onda.

### 3.1 Amplificador EDFA

Em redes ópticas WDM, à medida em que os caminhos ópticos são estabelecidos ou finalizados, a potência de entrada dos EDFAs pode variar. Caso os amplificadores operem sem controle de ganho e na região de saturação, as variações de potência afetarão o ganho do amplificador. Dessa maneira, um determinado caminho óptico pode ser mais ou menos amplificado na rede dependendo do número total de caminhos ópticos que passam pelo mesmo EDFA, causando graves penalidades à transmissão devido à saturação do receptor (altas potências) ou à sensibilidade do receptor (baixas potências).

Para evitar que as variações na potência de entrada do EDFA afetem o ganho dos caminhos ópticos ativos na rede, é de fundamental importância trabalhar com os EDFAs com controle automático de ganho e fora da sua região de saturação [Oliveira, 2007]. A Figura 3 apresenta uma ilustração do amplificador modelado neste trabalho. A faixa dinâmica representada em dB define o range de potência de entrada em que o amplificador consegue trabalhar com planicidade no ganho e na figura de ruído. Trabalhando na região plana (ganho e figura de ruído), em caso de reconfiguração dos caminhos ópticos na rede, os níveis de potência e OSNR dos sinais transmitidos não são afetados pelos amplificadores. Em [Oliveira, 2007], foi projetado um amplificador EDFA com faixa dinâmica superior a 33 dB.

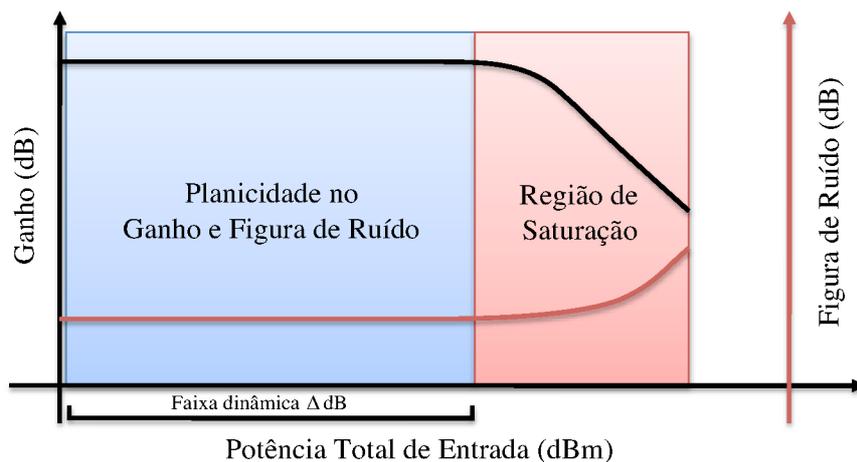


Figura 3. Ilustração do amplificador EDFA modelado.

## 4. Algoritmos de Alocação de Comprimento de Onda

A maioria dos algoritmos de alocação de comprimento de onda encontrados na literatura foram propostos e avaliados considerando a abordagem RWA convencional. O

propósito destes algoritmos é definir qual comprimento de onda deverá ser utilizado por cada caminho óptico estabelecido na rede WDM, de forma a minimizar a probabilidade de bloqueio de novas requisições de caminhos ópticos devido a ausência de comprimentos de onda disponíveis. Neste trabalho avaliaremos o desempenho de dois destes algoritmos (*First-Fit* e *Random*) considerando a abordagem RWA-IA proposta.

Em [Deng et al., 2004], os autores propuseram uma abordagem ao problema RWA-IA considerando as degradações ocasionadas pelo estabelecimento de novos caminhos ópticos nos demais já estabelecidos na rede. No entanto, os autores avaliaram apenas dois tipos de bloqueio. O primeiro tipo foi o ACO e um segundo equivalente a soma dos bloqueios OIN e OID. Desta forma, os autores não conseguiram avaliar o impacto de cada um dos três tipos de bloqueio de maneira isolada. Ainda neste trabalho, foi proposto o algoritmo *Crosstalk-aware Random Pick* (C-RP) para alocação de comprimento de onda. A estratégia adotada pelo algoritmo C-RP para minimizar a probabilidade de bloqueio se baseia na escolha do comprimento de onda disponível com menor degradação por *crosstalk* possível.

#### 4.1. Algoritmo Proposto

Antes de tentar propor um novo algoritmo de alocação de comprimento, realizamos algumas simulações preliminares com objetivo de avaliar o impacto de cada um dos três tipos de bloqueio (ACO, OIN, OID) no total de bloqueios da rede. Os resultados indicaram que os bloqueios OID foram os mais significativos. Este fato foi o motivador para a proposta de um novo algoritmo de alocação de comprimento de onda com objetivo de minimizar os bloqueios do tipo OID. O algoritmo proposto foi chamado de CIA – *Crosstalk Interference Avoidance*. De uma maneira geral, o algoritmo procura minimizar os bloqueios OID evitando alocar os comprimentos de onda que acarretariam em uma degradação nos caminhos ópticos mais frágeis em termos de OSNR estabelecidos na rede. O fluxograma apresentado na Figura 4 descreve o algoritmo proposto.

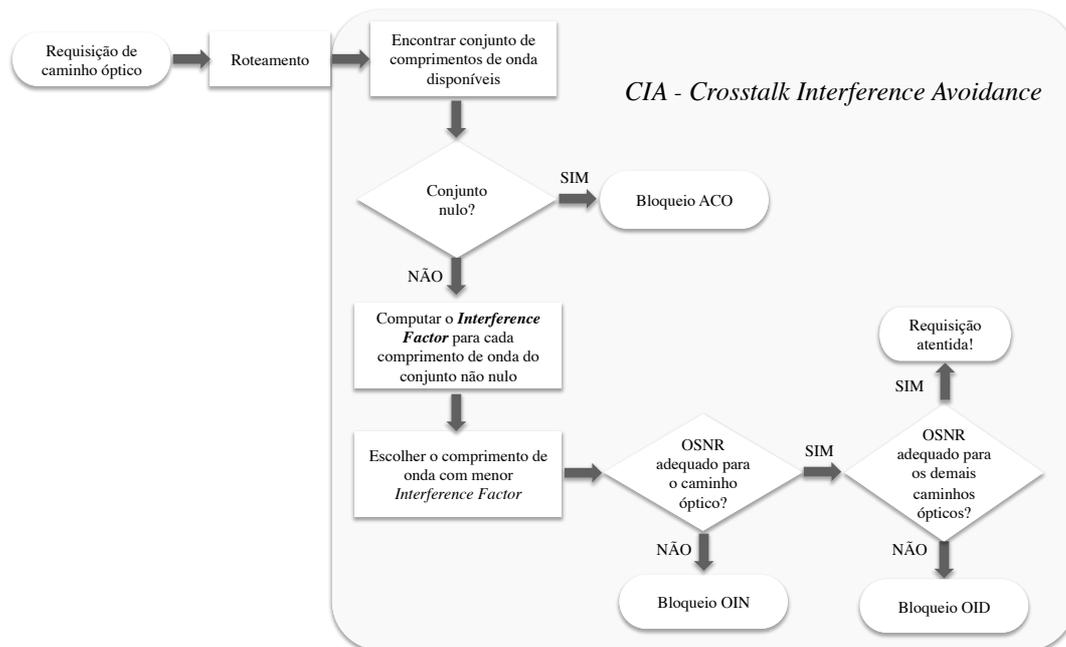


Figura 4. Diagrama do algoritmo *Crosstalk Interference Avoidance*.

Todos os caminhos ópticos estabelecidos devem anunciar ao plano de controle da rede o OSNR medido ou calculado no receptor do nó destino. Após a chegada de uma requisição de caminho óptico, deve-se avaliar quais os caminhos ópticos ativos sofrerão impacto no OSNR devido ao estabelecimento deste novo caminho óptico. Para todos os caminhos ópticos que seriam degradados, deve-se computar o  $\Delta\text{OSNR}$  ( $\text{OSNR}_{\text{Current}} - \text{OSNR}_{\text{Threshold}}$ ). O  $\text{OSNR}_{\text{Threshold}}$  representa o valor mínimo de OSNR tolerado pelo receptor óptico, e o  $\Delta\text{OSNR}$  representa portanto, a margem residual de OSNR do caminho óptico ativo. Quanto menor o  $\Delta\text{OSNR}$ , mais frágil à novas degradações é o caminho óptico. O *Interference Factor* é determinado pelo somatório de  $(1/\Delta\text{OSNR})$  de todas as conexões que seriam degradadas.

A seguir é apresentado um exemplo para ajudar a esclarecer os passos descritos no parágrafo anterior. Neste exemplo vamos admitir que um novo caminho óptico deva ser estabelecido. Vamos admitir também que existem cinco comprimentos de onda na rota escolhida para o estabelecimento do caminho óptico, e que cinco caminhos ópticos já estão ativos na rede (Figura 5). A primeira etapa do algoritmo é listar os comprimentos de onda disponíveis para a alocação do comprimento de onda ( $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  e  $\lambda_4$ ). Para cada um dos comprimentos de onda disponíveis, deve ser feita uma busca sobre o  $\Delta\text{OSNR}$  dos caminhos ópticos já ativos e que seriam degradados caso o novo caminho óptico fosse estabelecido no comprimento de onda em questão. Esta busca é realizada com base na tabela de ocupação de comprimentos de onda dos caminhos ópticos ativos na rede. Esta tabela geralmente é divulgada através do plano de controle da rede. Neste exemplo, caso o caminho óptico seja estabelecido no  $\lambda_3$ , os caminhos ópticos de número 3 e 5 seriam afetados, e o  $\Delta\text{OSNR}$  deles é de 0,5 dB e 1 dB respectivamente. Computando o *Interference Factor* para todos os comprimentos de onda disponíveis deste exemplo, o  $\lambda_4$  apresenta o menor deles, e portanto, seria o escolhido pelo algoritmo CIA.

	Disponibilidade	$\Delta\text{OSNR}$					<i>Interference Factor</i>
		CO 1	CO 2	CO 3	CO 4	CO 5	
$\lambda_1$	Ocupado	-	-	-	-	-	-
$\lambda_2$	Livre	-	0,2 dB	-	2 dB	-	5,5
$\lambda_3$	Livre	1	-	0,5 dB	-	1 dB	4
$\lambda_4$	Livre	1	-	-	-	1 dB	2
$\lambda_5$	Ocupado	-	-	-	-	-	-

Menor  
*Interference Factor*



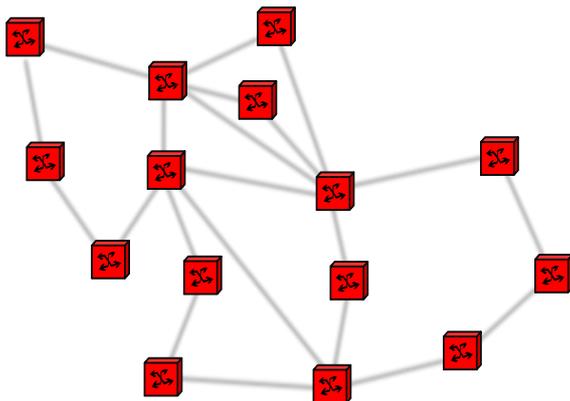
**Figura 5. Dados de referencia para o algoritmo CIA.**

De uma maneira geral, o algoritmo CIA procura evitar degradar os caminhos ópticos mais frágeis (menor  $\Delta\text{OSNR}$ ). Quanto mais caminhos ópticos frágeis na rede, maior a probabilidade de que novas requisições de estabelecimento de caminho óptico sejam bloqueadas por OID. Desta forma, podemos considerar que o algoritmo CIA é altruísta.

## 5. Resultados

Dada a complexidade da solução analítica para o cálculo da probabilidade de bloqueio de conexões em redes ópticas WDM, sob tráfego dinâmico e considerando as degradações de camada física, foi utilizada neste estudo a técnica de simulação. Para isso, estendemos a ferramenta SimRWA [Soares et al., 2005], capaz de avaliar o desempenho de redes ópticas WDM comutadas a circuito. A extensão envolveu a modelagem dos elementos e degradações de camada física descritos na seção 3.

Um modelo de tráfego dinâmico foi assumido, onde as requisições de estabelecimento de caminhos ópticos são geradas de acordo com um processo Poissoniano com taxa média equivalente a  $\lambda$ . A duração média dos caminhos ópticos respeita uma distribuição exponencialmente com média equivalente a  $1/\mu$ . Sendo assim, a carga oferecida à rede é equivalente a  $\lambda/\mu$ . As requisições de estabelecimento de caminhos ópticos são uniformemente distribuídas entre todos os pares de origem-destino. Todos os enlaces foram modelados com 100 Km. O protocolo de roteamento utilizado assume o menor caminho e os algoritmos de alocação de comprimento de onda avaliados foram o *Random*, *First-Fit*, C-RP e CIA. A Figura 6 apresenta a topologia e outras características da rede.



Parâmetros	Valor	Comentários
OSNR <sub>tx</sub>	45 dB	OSNR no Tx
OSNR <sub>rx</sub>	15 dB	Tolerância a OSNR no Rx
W	40	Número de canais
OXC <sub>is</sub>	55 dB	Isolação da Matriz de Comutação
DEM <sub>is</sub>	25 dB	Isolação em relação a porta vizinha
OXC <sub>il</sub>	4 dB	Perda de inserção do OXC
DEM <sub>il</sub>	4 dB	Perda de inserção do DEMUX
MUX <sub>il</sub>	6 dB	Perda de inserção do MUX
NF	5,5 dB	Figura de Ruído do amplificador
P <sub>sat</sub>	20 dBm	Potência de saturação do amplificador
FD	20 dB	Faixa dinâmica do amplificador
$\alpha$	0,2 dB	Coefficiente de atenuação da fibra

Figura 6. Topologia e características da rede óptica avaliada.

A Figura 7 apresenta a probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para os quatro algoritmos de alocação de comprimento de onda avaliados. O desempenho dos algoritmos *First-Fit* e *Random* foi, como esperado, inferior ao dos algoritmos C-RP e CIA. Isto porque estes algoritmos não consideram as degradações de camada física na escolha do comprimento de onda adequado para cada caminho óptico estabelecido.

Estudos de avaliação de desempenho dos algoritmos *First-Fit* e *Random* realizados com a abordagem RWA convencional demonstraram o melhor desempenho do algoritmo *First-Fit* [Zang et al., 2000]. No entanto, com a abordagem RWA-IA adotada neste trabalho, o desempenho do algoritmo *First-Fit* foi pior. Devido a estratégia de alocação sequencial do *First-Fit*, ele favorece a alocação de comprimentos de onda vizinhos na rede, potencializando as degradações por *crossstalk*.

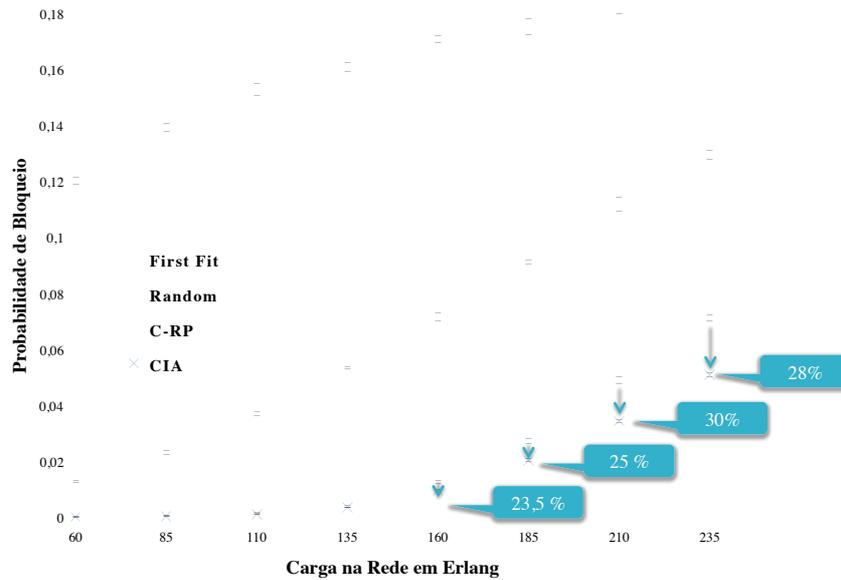


Figura 7. Resultados de probabilidade de bloqueio para os algoritmos avaliados.

Ainda na Figura 7, é possível notar o desempenho superior do algoritmo CIA proposto neste trabalho em relação ao algoritmo C-RP. Ambos os algoritmos consideram as degradações de camada física para a tomada de decisões. O diferencial do algoritmo CIA para alcançar um melhor desempenho foi a sua estratégia com objetivo de minimizar os bloqueios do tipo OID. Os resultados apresentados na Figura 8 corroboram com esta conclusão.

Como mencionado na seção 2, de acordo com a abordagem RWA proposta, as requisições para o estabelecimento de novos caminhos óptico podem ser bloqueadas por três distintas razões: ACO, OIN e OID. A Figura 8 apresenta o impacto de cada tipo de bloqueio nos resultados apresentados na Figura 7.

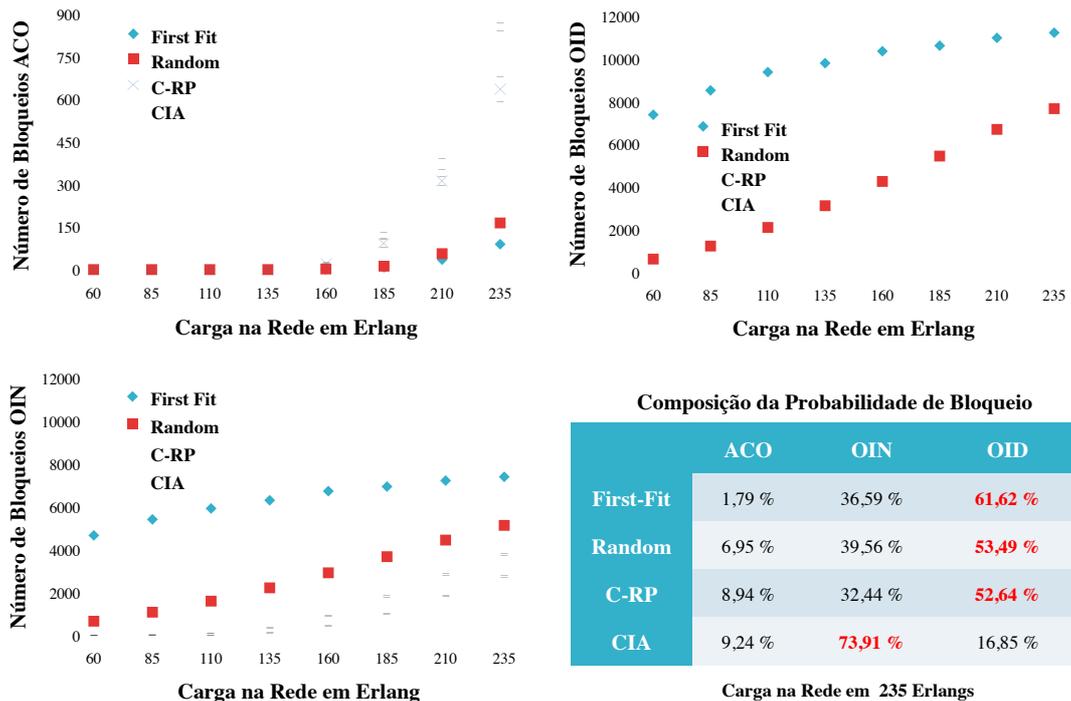


Figura 8. Composição da probabilidade de bloqueio.

É possível observar que dentre os três tipos de bloqueio, independente do algoritmo avaliado, a parcela de bloqueios ACO foi a menos significativa para o desempenho geral. Embora os algoritmos *First-Fit* e *Random* não considerem as degradações de camada física para a tomada de decisão, eles têm como objetivo minimizar os bloqueios ACO. Neste quesito eles são mais eficientes do que os algoritmos C-RP e CIA. No entanto, o bom desempenho na parcela de bloqueios ACO não foi o suficiente para os algoritmos *First-Fit* e *Random* superarem o desempenho dos algoritmos C-RP e CIA na probabilidade de bloqueio geral, como observado na Figura 7.

Para todos os algoritmos avaliados, com exceção do algoritmo CIA proposto neste trabalho, a parcela de bloqueios OID foi a mais significativa. É importante ressaltar que a análise de bloqueios OID de maneira isolada nunca antes fora investigada na literatura. Além disso, nenhum algoritmo de alocação de comprimento de onda proposto na literatura procura reduzir estes bloqueios. Estes fatos foram motivadores para a proposta do algoritmo CIA.

O algoritmo CIA foi concebido com objetivo de minimizar os bloqueios OID. O desempenho do algoritmo CIA apresentado na Figura 8 comprova que o objetivo foi alcançado. O melhor desempenho na parcela mais significativa de bloqueio fez com que o algoritmo CIA alcançasse o melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio entre os algoritmos avaliados.

Para a parcela de bloqueios OIN, o algoritmo C-RP alcançou o melhor resultado. Ao contrário do propósito altruísta do algoritmo CIA, o algoritmo C-RP procura alocar o recurso com menor degradação possível para o novo caminho óptico, mesmo que para isso, seja necessário tornar frágeis caminhos ópticos ativos da rede. Esta estratégia se mostrou eficiente para alcançar um melhor desempenho em bloqueios do tipo OIN. No entanto, observamos neste trabalho que quanto mais caminhos ópticos frágeis na rede, maior a probabilidade de que novas requisições de estabelecimento de caminho óptico sejam bloqueadas por OID. Os resultados apresentados nas Figuras 7 e 8 indicam que o propósito altruísta do algoritmo CIA foi mais eficiente para redução da probabilidade de bloqueio na rede investigada em comparação com o algoritmo C-RP.

## 6. Conclusões

Neste artigo foi apresentada uma nova abordagem ao problema RWA-IA que leva em consideração as degradações ocasionadas pelo estabelecimento de novos caminhos ópticos nos demais já estabelecidos na rede. Um estudo inédito foi realizado sobre o impacto dos bloqueios OID no desempenho de algoritmos de alocação de comprimento de onda. Para os três algoritmos da literatura que foram avaliados, a parcela de bloqueios OID foi a mais significativa na probabilidade de bloqueio da rede. Com objetivo de minimizar os bloqueios do tipo OID, foi proposto neste artigo um novo algoritmo de alocação de comprimento de onda, denominado CIA – *Crosstalk Interference Avoidance*. Os resultados comprovaram que o algoritmo conseguiu minimizar os bloqueios OID. O melhor desempenho na parcela mais significativa de bloqueio fez com que o algoritmo CIA alcançasse o melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio entre os algoritmos avaliados.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à PADTEC S/A pelo suporte oferecido.

## Referências

- Azodolmolky, S., Klinkowski, M., Marin, E., Careglio, D., Sole, J. and Tomkos, I. (2009) “A Survey on Physical Layer Impairments Aware Routing and Wavelength Assignment Algorithms in Optical Networks”, *Journal of Computer Networks*.
- Deng, T., Subramaniam, S. and Xu, J. (2004) “Crosstalk-aware Wavelength Assignment in Dynamic Wavelength-routed Optical Networks”, *IEEE BROADNETS*, pages 140-149.
- He, J. and Brandt-Pearce M. (2006) “Dynamic Wavelength Assignment Using Wavelength Spectrum Separation for Crosstalk Limited Networks”, *IEEE BROADNETS*.
- Murthy, C. S. R. and Gurusamy, M. (2002). *WDM Optical Networks - Concepts, Design and Algorithms*. Prentice Hall PTR.
- Oliveira, J. C. R. (2007) “Amplificadores Ópticos com Controle Automático de Ganho para Aplicação em Redes Ópticas Reconfiguráveis”, PhD Thesis, UNICAMP.
- Pereira, H., Chaves, D., Bastos-Filho, C. and Martins-Filho, J. (2007) “Impact of Physical Layer Impairments in All-optical Networks”, *IEEE IMOC*, pages 536-541.
- Pointurier, Y., Brandt-Pearce, M. and Subramaniam, S. (2007) “Analysis of Blocking Probability in Noise and Crosstalk Impaired All-Optical Networks”, *IEEE INFOCOM*, pages 2486-2490.
- Ramamurthy, B., Datta, D., Feng, H., Heritage, J. and Mukherjee, B. (1999) “Impact of Transmission Impairments on the Teletraffic Performance of Wavelength-routed Optical Networks”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, no. 10, pages 1713-1723.
- Soares, A. C. B., Maranhão, J. and Giozza, W. (2005). “SimRWA 2.0: Performance Evaluate Tool for RWA Algorithms and Survival Technics in All-optical Networks” *SBRC – Tools Exhibition*, pages 1231–1238.
- Soares, A. C. B., Maranhão, J. and Giozza, W. (2008) “First Load Priority: A Wavelength Converter Placement Scheme for Optical Networks”, *Revista Brasileira de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 23-36.
- Zang, H., Jue, J. and Mukherjee, B. (2000) “A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks,” *Optical Network Magazine*, pages 47-59.