

# Roteamento Adaptativo de Menor Caminho para Redes Ópticas Translúcidas

Gilvan Durães<sup>1</sup>, André Soares<sup>2</sup>, William Giozza<sup>3</sup>, José Suruagy Monteiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Núcleo de Pesquisa em Redes e Computação (NUPERC) – Universidade Salvador (UNIFACS) – Salvador – BA – Brasil

<sup>2</sup>Departamento de Informática e Estatística (DIE) – Universidade Federal do Piauí (UFPI) – Teresina – PI – Brasil.

<sup>3</sup>Departamento de Engenharia Elétrica (ENE) – Universidade de Brasília (UnB) – Brasília – DF – Brasil

gilvan.duraes@unifacs.br, andre.soares@ufpi.edu.br, giozza@unb.br, suruagy@unifacs.br

**Abstract.** *This work extends the problem of the best choice among  $M$  combinations of the shortest paths [1, 2] for translucent optical networks. To solve this problem, a new optical routing strategy, called Best Shortest Translucent Lightpath (BSTL), is proposed. Besides solving a typical deficiency of existing shortest path routing algorithms for translucent optical networks, BSTL strategy is adaptive and aware of the optical physical layer impairments. The BSTL algorithm is compared with other algorithms proposed in the literature, in terms of network utilization, blocking probability and fairness. In all scenarios evaluated, BSTL achieved a superior performance.*

**Resumo.** *Este trabalho estende o problema da escolha da menor rota [1, 2] para o caso das redes ópticas translúcidas. Para solucionar este problema, é proposta uma nova estratégia de roteamento óptico, chamada Best Translucent Shortest Lightpath (BSTL). Além de resolver uma deficiência típica dos atuais algoritmos de roteamento de menor caminho propostos para as redes ópticas translúcidas, a estratégia BSTL caracteriza-se por ser adaptativa e ciente das limitações da camada física óptica. O algoritmo BSTL é comparado com outros algoritmos propostos na literatura, em termos de utilização da rede, probabilidade de bloqueio e justiça no atendimento das requisições. Em todos os cenários avaliados, o algoritmo BSTL apresentou um melhor desempenho.*

## 1. Introdução

Nas redes ópticas translúcidas é possível regenerar o sinal óptico ao longo de uma rota visando restaurar a sua qualidade inicial. Atualmente, considerando-se as limitações de alcance da tecnologia de transmissão por fibra óptica, apenas esse tipo de rede óptica pode compor os *backbones* de longa distância da Internet [3].

As redes ópticas tiveram um grande avanço com o surgimento e desenvolvimento da tecnologia *Wavelength Division Multiplexing* (WDM). Essa tecnologia permite o estabelecimento de diversas conexões ópticas simultaneamente em uma mesma fibra óptica, em diferentes comprimentos de onda [4].

A arquitetura de uma rede óptica pode ser classificada em opaca, transparente ou translúcida [5]. Nas redes ópticas opacas todos os nós são opacos. Cada nó opaco requer um conversor Óptico-Eletro-Óptico (OEO) que converte o sinal óptico, oriundo de uma porta de entrada, em sinal eletrônico para ser processado eletronicamente antes de ser encaminhado para uma porta de saída. Conversores OEO inserem atrasos desnecessários na rede óptica, além de aumentarem o custo dos nós.

Diferentemente das redes ópticas opacas, nas redes ópticas transparentes não há conversão OEO nos nós intermediários de uma determinada rota. Neste caso, o sinal óptico é comutado sem sair do domínio óptico através de *switches* que fazem uso, por exemplo, de matrizes de comutação construídas com micro-espelhos programáveis [4]. Portanto, as redes ópticas transparentes eliminam o atraso de comutação inerente à conversão do sinal óptico para o nível eletrônico em um nó intermediário de uma rota.

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 dessas degradações ao longo da rota, a taxa de erro de bit (*Bit Error Rate* (BER)) no receptor se torna cada vez maior e pode atingir níveis intoleráveis [3,5]. Com o estágio atual da tecnologia, em rotas longas é necessária uma conversão OEO para viabilizar a regeneração do sinal óptico em um nó intermediário [3]. Desta forma, uma nova arquitetura de rede óptica que utiliza conversão OEO em alguns nós intermediários da rede e comutação puramente óptica em outros nós, se torna cada vez mais uma realidade. Essa arquitetura de rede que tem como objetivo agregar a agilidade de uma rede óptica transparente à qualidade do sinal óptico garantido com a conversão OEO é conhecida como rede óptica translúcida [3, 5]. Neste trabalho é considerada uma rede óptica translúcida onde os nós opacos estão distribuídos de forma esparsa na rede, isto é, apenas alguns nós da rede óptica possuem a capacidade de realizar conversão OEO [5].

O problema de rotear e alocar comprimentos de onda durante a operação de uma rede óptica, visando atender um maior número de solicitações dinâmicas de circuitos ópticos (*lightpaths*) é conhecido como *Routing and Wavelength Assignment* (RWA) ou RWA dinâmico. No problema RWA dinâmico, os algoritmos de roteamento podem ser separados em três classes: roteamento fixo, roteamento alternativo e roteamento exaustivo [6].

No roteamento fixo, cada par de nós (origem, destino) da rede óptica dispõe de apenas uma rota que é computada previamente. Assim, antes mesmo de surgir uma requisição de circuito óptico para um par de nós qualquer, o plano de controle responsável pelo roteamento já sabe qual rota deve ser utilizada. Essas rotas são computadas previamente utilizando normalmente um algoritmo clássico de menor caminho, como o algoritmo de Dijkstra [7] ou outros algoritmos propostos especificamente para redes ópticas [1, 8, 9].

No roteamento alternativo, um conjunto com mais de uma rota é definido previamente para cada par (origem, destino). O roteamento alternativo pode ainda ser

classificado em roteamento fixo alternativo ou roteamento adaptativo alternativo. A diferença entre eles é a forma como é feita a seleção de uma rota do conjunto previamente definido de rotas alternativas. No roteamento fixo alternativo [6, 9], as rotas são previamente ordenadas, por exemplo, em função do número de saltos. A seleção da rota é feita seguindo a ordem previamente definida. Se a primeira rota não possuir recursos disponíveis, as rotas seguintes serão analisadas uma a uma até ser encontrada uma rota com recursos disponíveis. Se nenhuma das alternativas de rotas pré-definidas tiver um comprimento de onda contínuo livre, a requisição será bloqueada. No roteamento adaptativo alternativo ou, simplesmente, adaptativo [6], a seleção de uma rota do conjunto de rotas definido previamente é feita de acordo com informações do estado atual da rede. Por exemplo, pode-se alocar a rota menos carregada.

Os algoritmos da classe de roteamento exaustivo não realizam nenhum cálculo prévio de rotas entre cada par de nós (origem, destino). Esses algoritmos têm como vantagem a capacidade de utilizar qualquer rota possível da topologia na tentativa de estabelecer um circuito óptico. Com isso, uma requisição de circuito óptico apenas será bloqueada se nenhuma rota, entre sua origem e destino, dispuser de pelo menos um comprimento de onda contínuo livre. Por outro lado, os algoritmos da classe de roteamento exaustivo apresentam maior complexidade de implementação, quando comparado com algoritmos de outra classe de roteamento [6].

Este trabalho propõe e apresenta um novo algoritmo de roteamento adaptativo para redes ópticas translúcidas, chamado *Best Shortest Translucent Lightpath* (BSTL). O BSTL é inspirado no algoritmo *Best among Shortest Routes* (BSR) que explora o problema de roteamento fixo em redes ópticas transparentes [1, 2]. Diferentemente do BSR que se baseia em roteamento fixo, o BSTL é adaptativo e considera restrições relacionadas com as limitações da camada física óptica.

O problema de roteamento dinâmico ciente das degradações da camada física é considerado mais difícil que o problema correspondente para redes ópticas transparentes [10]. As degradações físicas na transmissão por fibra óptica podem ser classificadas em duas categorias: lineares e não lineares. As degradações lineares ocorrem independentemente da potência do sinal óptico e afetam cada comprimento de onda individualmente na fibra. Já os efeitos das degradações não lineares crescem com a potência do sinal óptico e tendem a degradar todos os comprimentos de onda. As principais degradações lineares da camada física óptica tais como, atenuação da fibra, perda de inserção, ruído da emissão espontânea de amplificador, dispersão por modo de polarização e *crosstalk* já estão relativamente bem caracterizadas [11]. Por outro lado, as degradações não lineares da camada física óptica são relativamente complexas de serem caracterizadas e sua modelagem necessita de conhecimentos detalhados da infraestrutura de componentes ópticos da rede. Pode-se, no entanto, adotar um modelo simplificado onde os efeitos não lineares sejam mitigados através da minimização do número de enlaces que o sinal óptico percorre [12].

A maioria dos efeitos de degradação que o sinal óptico sofre ocorre em função da distância e/ou do número de comutadores envolvidos na propagação do sinal óptico de um nó origem para um nó destino. Neste trabalho considera-se um limite para o número de saltos sem regeneração do sinal óptico. Um *lightpath* necessita ter seu sinal regenerado (*lightpath* translúcido) quando ele alcança um determinado número limite de

saltos, este é o Limite de Degradação – *Impairment Threshold* [9]. Muitos trabalhos na literatura apontam a limitação do número de saltos como a principal métrica de qualidade do sinal óptico em redes ópticas translúcidas [3, 5, 9, 11, 13].

Com essa limitação do número de saltos, uma rota entre um par de nós (origem, destino) necessita respeitar o limite pré-determinado de número de saltos sem regeneração do sinal para que ele tenha a qualidade desejada de sinal óptico. Supondo que a qualidade de sinal óptico desejada implique em um limite de 2 saltos (*Impairment Threshold* igual a 2), uma rota será considerada *viável* se a cada 2 saltos esta rota possuir um nó regenerador (OEO). A Figura 1 ilustra duas rotas entre o par de nós (*Origem*, *Destino*). A Rota A é uma rota inviável, pois possui quatro saltos sem passar por um nó regenerador. Já a Rota B é viável porque após 2 saltos o sinal é regenerado no nó R1, recuperando as suas qualidades iniciais e podendo alcançar o nó destino com mais 2 saltos.

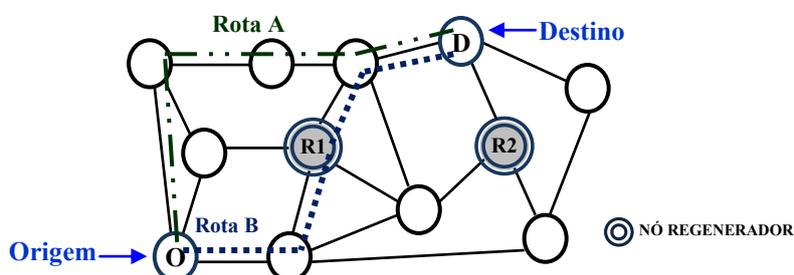


Figura 1. Rota Viável x Rota Não Viável.

As demais seções deste artigo estão organizadas da seguinte forma. A Seção 2 discute os trabalhos relacionados. A Seção 3 apresenta uma generalização do problema da escolha do menor caminho para redes ópticas translúcidas. A Seção 4 apresenta a heurística de roteamento proposta cuja avaliação de desempenho é realizada na Seção 5. Por fim, as considerações finais são feitas na Seção 6.

## 2. Trabalhos Relacionados

O problema de roteamento e alocação de comprimento de onda ciente da degradação do sinal óptico vem sendo muito estudado nos últimos anos [3, 9, 10, 11, 13].

Em [11] é realizado um levantamento bibliográfico com classificação de diversos algoritmos RWA cientes da degradação da camada física óptica. As estratégias de roteamento são classificadas em único caminho (*single path*) ou múltiplos caminhos (*multi-path*). As estratégias de múltiplos caminhos, ou múltiplas rotas, buscam em  $n$  rotas alguma rota que seja *viável* para o atendimento de uma requisição de *lightpath*. Todas elas utilizam o algoritmo de menor caminho para cômputo das rotas.

Rai, Su e Mukherjee, em [13], propõem uma heurística de roteamento em redes ópticas translúcidas, baseada em um algoritmo de busca com informação, a qual visa escolher rotas viáveis com o menor número de saltos.

Em [9], F. Kuipers e outros propõem o algoritmo *Polynomial-time Impairment-Aware Routing Algorithm* (PIARA) para redes ópticas translúcidas com distribuição esparsa de nós regeneradores. Calculando o custo dos enlaces com base nas degradações de camada física óptica, o PIARA calcula rotas viáveis de menores custos entre pares de

nós (origem, destino), passando, caso necessário, por nós regeneradores. Essas rotas são obtidas com auxílio de um algoritmo clássico de menor caminho que é utilizado como um módulo dentro do algoritmo PIARA, o qual não faz uso de rotas pré-calculadas. Desta forma, o algoritmo PIARA se classifica como um algoritmo exaustivo.

A seguir, é apresentado um resumo das etapas do algoritmo PIARA [9].

Notação utilizada:

- $G$  – grafo que representa a topologia de rede;
- $N_R$  – conjunto de nós regeneradores contido em  $G$ ;
- $s$  – nó origem contido em  $G$ ;
- $d$  – nó destino contido em  $G$ ;
- $P_{u,v}$  – caminho para o par de nós  $(u,v)$ ;
- $r(P_{u,v})$  – acúmulo de degradação na rota  $P_{u,v}$ ;
- $IT$  – *Impairment Threshold* (Limite de Degradação).

**Algoritmo PIARA:**

- 
- 1) Para cada par de nós  $u,v \in N_R \cup \{s,d\}$  calcule o **menor caminho**  $P_{u,v}$ ;
  - 2) Construa um grafo auxiliar  $G'$  formado pelos nós  $N_R \cup \{s,d\}$ . Existe um enlace entre os nós  $u,v \in N_R \cup \{s,d\}$  em  $G'$  se  $r(P_{u,v}) \leq IT$ .
  - 3) Configure o custo de cada enlace  $(u,v)$  em  $G'$  igual a  $r(P_{u,v})$ ;
  - 4) Calcule o **menor caminho** de  $s$  para  $d$  em  $G'$  e substitua os enlaces do caminho em  $G'$  pelo subcaminho correspondente em  $G$ .
- 

Como exemplificado, todas as estratégias de roteamento utilizadas nesses trabalhos fazem uso do algoritmo de menor caminho (*e.g.*, Algoritmo de Dijkstra) na busca de uma solução de roteamento de comprimento de onda. Justamente por utilizar um algoritmo de menor caminho em sua concepção ou como módulo contido em suas soluções, essas estratégias apresentam uma deficiência quando há mais de um menor caminho possível para escolha. Este trabalho evidencia esta deficiência por parte dos atuais algoritmos de roteamento em redes ópticas translúcidas e propõe uma nova estratégia de roteamento que permite utilizar de maneira mais eficiente os recursos de uma rede óptica translúcida caracterizada por possuir um limite de alcance para o sinal óptico.

### 3. O Problema 3MC nas Redes Ópticas Translúcidas

Em [1, 2] é apresentado o problema da Escolha da Melhor Combinação Entre as M Combinações de Menores Caminhos (3MC) que mostra a variabilidade de opções de menor caminho existentes e suas implicações no desempenho das redes ópticas transparentes. Esta seção apresenta uma extensão do problema 3MC identificado nas redes ópticas translúcidas.

Conforme explanado anteriormente, nas redes ópticas translúcidas nem todos os caminhos são ditos viáveis, por conta das restrições de nível físico do sinal óptico. Com isso, nesta definição do problema, limitam-se os menores caminhos apenas às rotas viáveis.

Dada uma topologia de rede óptica com  $N$  nós, o número de pares de nós (origem, destino) é  $N \times (N - 1)$ . Será utilizada a notação  $par(o,d)$  para representar um

par ordenado de nós com origem no nó  $o$  e destino no nó  $d$ . Para realizar o roteamento adaptativo é necessário definir uma rota dinamicamente para cada requisição de circuito óptico. Assumido que o  $par(o,d)$  utiliza a mesma rota do  $par(d,o)$  com alteração apenas do sentido da rota, então, é suficiente definir apenas as rotas de ida. Dessa forma, é necessária a definição de pelo menos  $R = (N \times (N-1))/2$  rotas para uma dada topologia com  $N$  nós, uma para cada requisição de circuito  $(o,d)$ .

Conforme apresentado na seção anterior, a maioria dos trabalhos na literatura utiliza os algoritmos clássicos de menor caminho (*Dijkstra* e *Bellman-Ford*) para definir o roteamento ou para compor a solução de roteamento, quer seja roteamento fixo, alternativo ou exaustivo. Esses algoritmos que muitas vezes são utilizados como “módulos” em outros algoritmos têm como objetivo encontrar um menor caminho para cada  $par(o,d)$ . No entanto, entre dois nós (origem, destino) pode existir mais de um menor caminho viável. Por exemplo, na topologia chamada *Ring with 6 Nodes and one Transversal Link* (R6NTL), considerando o limite de degradação igual a 2 saltos e com o nó 2 sendo um nó opaco regenerador, conforme ilustrado na Figura 2, há dois menores caminhos viáveis para o  $par(1,4)$ , todos com três saltos. São eles: 1-2-3-4 e 1-2-5-4. Sem distinção, um algoritmo clássico de menor caminho escolhe qualquer um desses caminhos com três saltos.

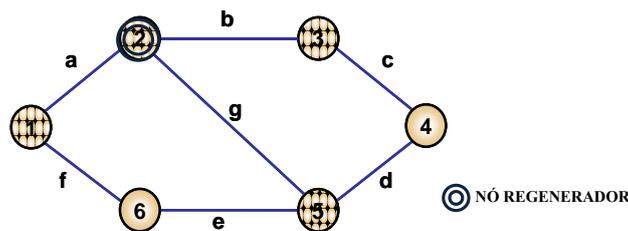


Figura 2. Topologia R6NTL.

Desta forma, como cada  $par(o,d)$  pode ter mais de uma rota de menor caminho viável (chamadas neste trabalho de Rotas Candidatas Viáveis – RCV), existem  $M$  soluções diferentes para a escolha de rotas viáveis em uma determinada topologia de rede óptica translúcida. O cálculo de  $M$ , que representa o número de soluções possíveis, é dado pela equação 1,

$$M = \prod_{i=1, j=1}^{N,N} RCV_{par(i,j)} \quad (1)$$

onde,  $RCV_{par(i,j)}$  indica o número de rotas de menor caminho candidatas para o  $par(i,j)$ , com  $i \neq j$ . Note que todas as rotas candidatas são rotas viáveis e têm o menor número de saltos.

Exemplificando o cálculo de  $M$  para a topologia R6NTL (Fig. 2), tem-se que  $M = 1^9 \times 2^6 = 64$ . Isso porque a topologia R6NTL contém 9 pares de nós (origem, destino) com apenas uma rota candidata de menor caminho viável e 6 pares com 2 rotas candidatas de menor caminho viáveis. Portanto, considerando-se todas as rotas candidatas de menor caminho viáveis para cada  $par(o,d)$  na topologia R6NTL, observa-se a possibilidade de  $M=64$  combinações diferentes de menores caminhos.

A Tabela 1 apresenta todas as rotas viáveis de menor caminho para cada  $par(o,d)$  da topologia R6NTL. As rotas computadas para cada  $par(o,d)$  pelo algoritmo PIARA [8] estão indicadas com um asterisco na Tabela 1.

Tabela 1. Menores Caminhos para a Topologia R6NTL.

Par de Nós (Origem, Destino)	(1,2)	(1,3)	(1,4)		(1,5)	(1,6)	(2,3)	(2,4)
Menores Caminhos Viáveis	1-2*	1-2-3*	1-2-3-4* 1-2-5-4		1-2-5* 1-6-5	1-6*	2-3*	2-3-4* 2-5-4
Par de Nós (Origem, Destino)	(2,5)	(2,6)	(3,4)	(3,5)	(3,6)	(4,5)	(4,6)	(5,6)
Menores Caminhos Viáveis	2-5*	2-1-6* 2-5-6	3-4*	3-2-5* 3-4-5	3-2-1-6* 3-2-5-6	4-5*	4-5-6*	5-6*

Pode-se então redefinir o problema da escolha da Melhor Combinação entre as  $M$  Combinações de Menores Caminhos (3MC) [1, 2] como sendo o de identificar uma solução de rotas viáveis de menor caminho  $S_k$  com  $1 \leq k \leq M$ , tal que a combinação  $S_k$  resulte em um melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio da rede. Nota-se que esta nova definição não invalida o conceito do problema 3MC em [1,2], mas sim o generaliza para as redes ópticas translúcidas.

A Tabela 2 apresenta o número de rotas  $R$  de uma solução  $S_k$ , a soma do número de rotas candidatas de menor caminho ( $\Sigma RC$ ) de todos os  $par(o,d)$  e o número  $M$  de soluções para o problema 3MC, analisando-se diferentes topologias e cenários de limitação do sinal óptico (*Impairment Threshold – IT*). Foram consideradas a topologia R6NTL (Fig. 2) e as topologias I e II (Fig. 3), as quais se assemelham com *backbones* de redes ópticas nos EUA e são topologias de interesse nos estudos de redes ópticas translúcidas [9, 13]. Os nós opacos OEO foram distribuídos de forma aleatória, evitando o posicionamento em nós adjacentes.

Tabela 2. Exemplos de Topologias, IT e seus Respectivos Valores de R,  $\Sigma RC$  e M.

Topologia de Rede	R	Nós OEO	Alcance Óptico (IT)	$\Sigma RC$	M
R6NTL (Fig. 2)	15	1	2 Saltos	21	64
Topologia I (Fig. 3)	276	4	2 Saltos	389	$2,02 \times 10^{39}$
			3 Saltos	580	$5,038 \times 10^{63}$
			5 Saltos	638	$5,64 \times 10^{68}$
		8	2 Saltos	384	$1,19 \times 10^{36}$
			3 Saltos	590	$1,23 \times 10^{64}$
			5 Saltos	640	$7,14 \times 10^{68}$
Topologia II (Fig. 3)	190	4	2 Saltos	369	$7,42 \times 10^{12}$
			3 Saltos	519	$6,61 \times 10^{47}$
			5 Saltos	585	$3,89 \times 10^{56}$
		8	2 Saltos	397	$1,43 \times 10^{18}$
			3 Saltos	544	$6,81 \times 10^{49}$
			5 Saltos	588	$5,11 \times 10^{56}$

Observa-se na Tabela 2 que o valor de  $M$  cresce rapidamente à medida que se têm mais pares de nós e mais rotas candidatas à menor rota escolhida para um determinado  $par(o,d)$ . Observa-se ainda que diminuindo o limite de alcance do sinal

óptico ( $IT=2$ ), diminuí também o número de rotas candidatas, porém o número de combinações de rotas viáveis de menores caminhos continua sendo um número extremamente alto, o que pode ser considerada uma boa oportunidade para a escolha criteriosa de rotas de menor caminho como solução de roteamento adaptativo.

Os algoritmos que utilizam como módulo um algoritmo clássico de menor caminho encontram uma solução  $S_k$  qualquer do universo de  $M$  soluções para o problema 3MC. Isso é feito sem o uso de um critério para identificar a melhor dentre as  $M$  combinações de soluções possíveis. Por exemplo, aplicando-se o algoritmo PIARA para encontrar o menor caminho viável para cada  $par(o,d)$  na topologia R6NTL, obtém-se uma sobrecarga na utilização dos enlaces “a” e “b” (Fig. 2). Cada um desses enlaces apresenta 77% de utilização, enquanto que os enlaces “e” e “d” estão com 26% de utilização.

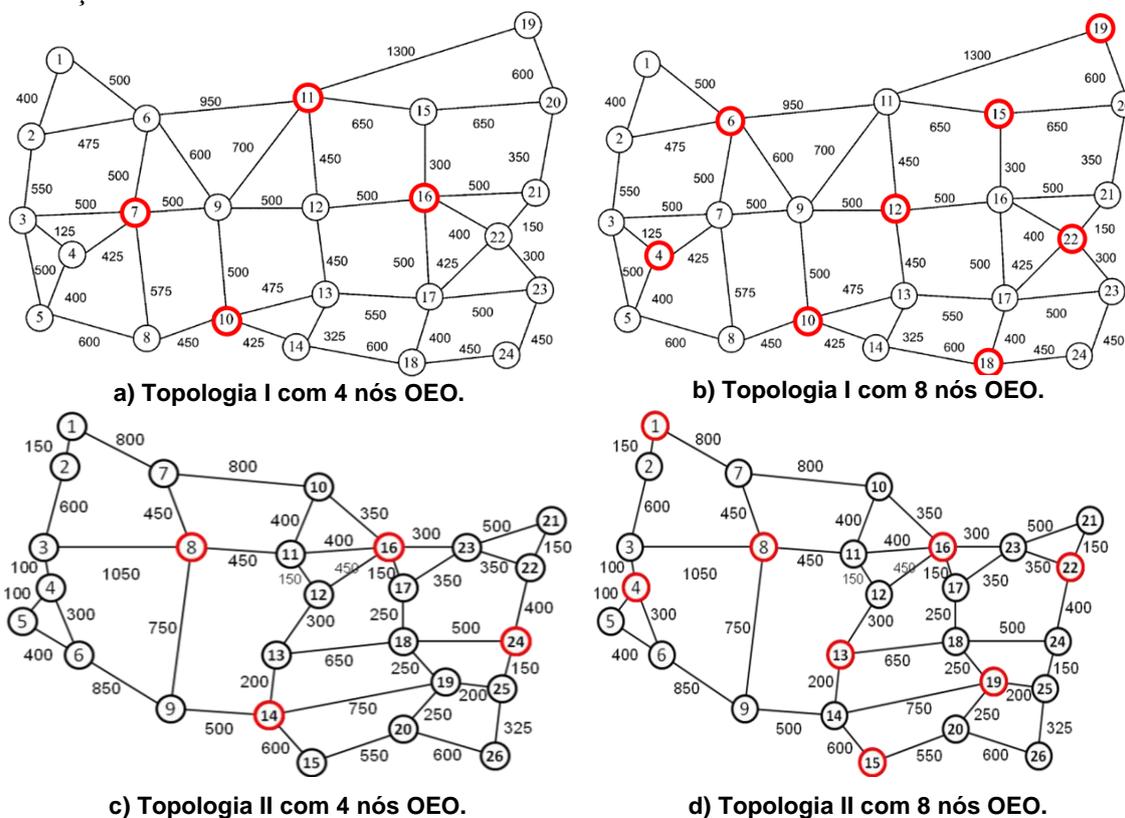
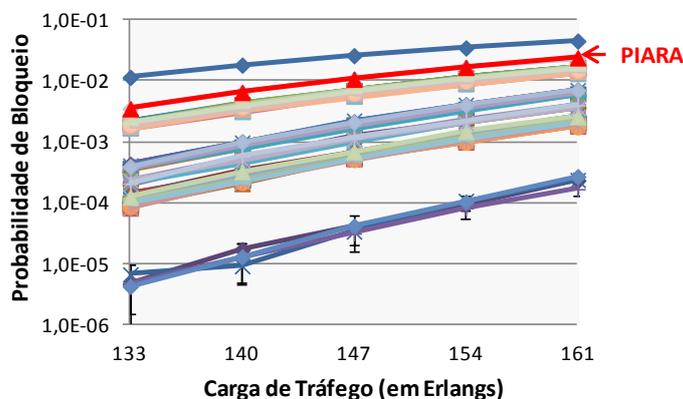


Figura 3. Topologias de Rede Avaliadas [13].

Visando obter o desempenho para cada uma das possíveis combinações ( $M=64$ ) de menores caminhos na topologia R6NTL, foram realizadas 64 simulações com todas as possíveis rotas (viáveis) de menores caminhos existentes. Neste caso, identificou-se a melhor combinação de rotas uma vez que se trata de uma topologia com poucos nós e enlaces. Por outro lado, a simulação de todas as possíveis soluções passa a ser impraticável com o aumento do número de nós e de enlaces da rede. Esse crescimento da topologia da rede implica numa explosão do número  $M$  de combinações de menores caminhos, mesmo com a limitação de alcance óptico (Tab. 2).

As características dessas simulações, tais como o número de requisições geradas, o tipo de tráfego e o algoritmo de alocação de comprimento de onda são os mesmos descritos na Seção de Resultados Simulação (Seção 5).

A Figura 4 mostra um gráfico com as 64 curvas de probabilidade de bloqueio para uma rede óptica translúcida com a topologia apresentada na Figura 2.



**Figura 4. Desempenho obtido para cada uma das  $M=64$  Combinações de Menores Rotas Viáveis no Cenário da Topologia R6NTL/IT=2.**

Cada curva na Figura 4 representa o desempenho de uma solução de roteamento dentre as  $M=64$  possíveis soluções para o problema 3MC em função da carga de tráfego na rede. O desempenho da solução de roteamento encontrada pelo algoritmo PIARA [9] está destacado no gráfico.

Nota-se que mesmo sendo um algoritmo exaustivo, o algoritmo PIARA sempre encontrará as mesmas rotas no cenário avaliado, uma vez que o limite de alcance do sinal óptico não é alterado. Por outro lado, vale ressaltar a variabilidade dos resultados de probabilidade de bloqueio em função das diferentes combinações de rotas existentes em um dado cenário, mostrando a necessidade de uma escolha mais criteriosa quanto à definição dinâmica da rota de menor caminho em uma rede óptica translúcida.

#### 4. Heurística Proposta

Esta seção apresenta o algoritmo *Best Shortest Translucent Lightpath* (BSTL), da classe de roteamento adaptativo ciente das degradações da camada físicas, proposto para redes ópticas translúcidas.

O algoritmo BSTL faz uso da métrica utilização dos enlaces (número de comprimentos de onda em uso) para encontrar a melhor solução para o problema 3MC. O desafio do algoritmo BSTL proposto é balancear a carga entre os enlaces da rede de modo a diminuir a probabilidade de bloqueio das requisições de circuitos ópticos, sem, contudo, infringir as restrições impostas, de forma a viabilizar o atendimento das requisições.

O funcionamento do algoritmo BSTL, assim como o de qualquer algoritmo da classe de roteamento adaptativo, é dividido em duas etapas: etapa de cálculo de rotas alternativas e etapa de operação. O cálculo de rotas alternativas ocorre na fase de planejamento da rede. Nessa fase inicial, as rotas alternativas de cada par de nós ( $o$ ,  $d$ ) são previamente calculadas e armazenadas para posterior consulta e escolha.

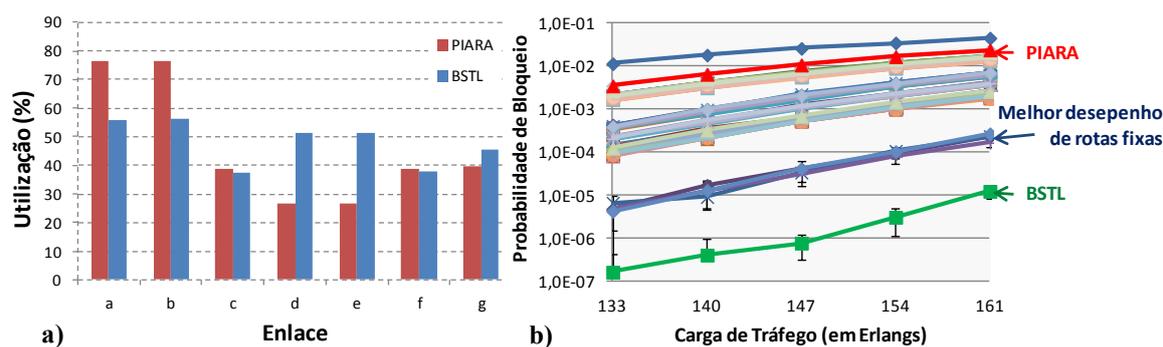
A segunda etapa do algoritmo BSTL coincide com a fase de operação da rede, na qual o BSTL escolhe, dentre as rotas de menor caminho pré-calculadas, a rota viável com maior disponibilidade de comprimento de onda contínuo para o atendimento da requisição de circuito óptico. Esta fase de escolha dinâmica da rota é inspirada no

algoritmo *Least Loaded Routing* (LLR) [14]. O algoritmo LLR sempre busca atender a requisição de *lightpath* na primeira rota alternativa. Apenas no caso em que não seja possível o atendimento na primeira rota alternativa é que ocorre o balanceamento de carga entre as demais rotas alternativas. Entretanto, diferentemente do LLR, o algoritmo BSTL realiza o balanceamento de carga entre todas as rotas alternativas pré-calculadas.

A seguir, é apresentado um resumo das etapas do algoritmo **BSTL**.

- 
- 1) [Planejamento] – Calcular todas as rotas de menor caminho para cada *par* ( $o, d$ );
  - 2) [Operação] – Retornar dentre as rotas pré-calculadas, a rota que possuir maior disponibilidade de comprimento de onda contínuo.
- 

A Figura 5a mostra a utilização média de cada enlace da topologia R6NTL (Fig. 2) para os algoritmos BSTL e PIARA (sob uma carga de tráfego equivalente a 161 Erlangs). Aplicando o algoritmo PIARA, os enlaces “a” e “b” apresentam utilização igual a, aproximadamente, 77%, enquanto que os enlaces “e” e “d” ficam com utilização igual a, aproximadamente 26%, sobrecarregando esses últimos. Por outro lado, com o algoritmo BSTL, a utilização dos enlaces da rede permanece entre 38% e 56%. Isto mostra a eficácia do algoritmo BSTL em termos de balanceamento de carga entre os enlaces da rede.



**Figura 5. Utilização dos Enlaces e Probabilidade de Bloqueio do PIARA e BSTL para a topologia R6NTL/IT=2.**

A Figura 5b mostra o desempenho das soluções encontradas pelos algoritmos PIARA e BSTL em termos de probabilidade de bloqueio. Nota-se que com o BSTL, a rota escolhida para atender a uma determinada requisição de circuito óptico do *par* ( $o, d$ ) pode não ser a mesma que atendeu à última requisição do mesmo *par*. Desta forma, o BSTL consegue alcançar um desempenho superior ao de um algoritmo que escolha dentre uma combinação de rotas fixas de melhor desempenho. De acordo com os resultados mostrados na Figura 5b, a estratégia BSTL alcançou um desempenho de, aproximadamente 0,0005 de probabilidade de bloqueio para o último ponto de carga (161 Erlangs), enquanto que o algoritmo PIARA obteve 0,024 de probabilidade de bloqueio para o mesmo valor de carga.

O tempo médio de execução do algoritmo PIARA neste estudo preliminar, considerando a topologia R6NTL/IT=2, foi de 1,1 milissegundos, enquanto que o algoritmo BSTL levou em média 0,04 milissegundos para ser executado no mesmo cenário. Este comportamento é justificado pelo fato do algoritmo PIARA, inserido na classe de roteamento exaustivo [9], apresentar maior complexidade de implementação

do que o algoritmo BSTL, da classe de roteamento adaptativo alternativo. Com o algoritmo PIARA são necessárias informações do estado atualizado de todos os enlaces da rede para cálculo de rotas parciais e geração do grafo auxiliar que irá conduzir a escolha da rota final. Já a estratégia BSTL proposta neste trabalho possui menor complexidade de implementação na fase de operação, uma vez que apenas os enlaces que compõem as rotas candidatas (pré-computadas) são analisados para a escolha de uma dessas rotas.

## 5. Resultados de Simulação

A ferramenta de simulação TONetS [15] foi estendida para suportar os estudos de avaliação de desempenho dos algoritmos de roteamento para redes translúcidas considerados neste trabalho. Nesta nova versão do TONetS é possível simular os seguintes algoritmos: algoritmo aleatório de posicionamento de nós opacos, e algoritmos de roteamento cientes das limitações da camada física – PIARA e BSTL.

Este estudo de avaliação de desempenho, bem como os resultados de simulação apresentados na Seção 3, têm as seguintes características básicas. A demanda de tráfego é composta por requisições de circuitos ópticos representados por pares de nós (origem, destino). A carga de tráfego é distribuída uniformemente entre todos os  $N \times (N - 1)$  pares de nós (origem, destino). A geração de requisições é um processo poissoniano de taxa média  $\lambda$  e o tempo médio de retenção dos circuitos é distribuído exponencialmente com média  $1/\mu$ ; a intensidade de tráfego na rede em *Erlangs* é dada por  $\rho = \lambda/\mu$ . Todos os enlaces da rede são bidirecionais e possuem 40 comprimentos de onda em cada sentido. O algoritmo *First-Fit* [6], pela sua simplicidade e desempenho, é utilizado na alocação dos comprimentos de onda. Para cada simulação são realizadas cinco replicações com diferentes sementes de geração de variável aleatória. São geradas cinco milhões de requisições para cada replicação. Os resultados gráficos apresentam os intervalos de confiança calculados com um nível de confiança de 95%.

Nesta avaliação, o algoritmo BSTL é comparado com o algoritmo *PIARA* [9] considerando as topologias e as distribuições de nós opacos regeneradores (distribuídos de forma aleatória, evitando nós vizinhos) ilustradas na Fig. 3. Inicialmente é realizado um estudo de avaliação de desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de requisições de circuitos ópticos e de utilização da rede. Numa segunda etapa, é avaliada a justiça no atendimento das requisições de cada par de nós (origem, destino).

### 5.1. Probabilidade de Bloqueio

As Figuras 6.a, 6.b, 6.c e 6.d mostram os resultados referentes à probabilidade de bloqueio e à utilização da rede para os cenários ilustrados nas Figuras. 3a, 3.b, 3.c e 3d, respectivamente.

Analisando os resultados de probabilidade de bloqueio na Figura 6, observa-se que o BSTL apresentou um desempenho superior ao PIARA para os quatro cenários avaliados. Por utilizar um algoritmo simples de menor caminho, o PIARA não apresenta nenhum critério extra para escolher uma rota, além do critério de menor caminho. Ele simplesmente escolhe um menor caminho qualquer, conforme visto na Seção 3. No BSTL, além das rotas escolhidas para cada  $par(o, d)$  serem uma combinação dentre as  $M$  Combinações de Menores Caminhos existentes, elas são escolhidas com o objetivo de

balancear a carga (frequência de uso) entre todos os enlaces da rede. Isto faz o BSTL ter um desempenho superior ao algoritmo PIARA.

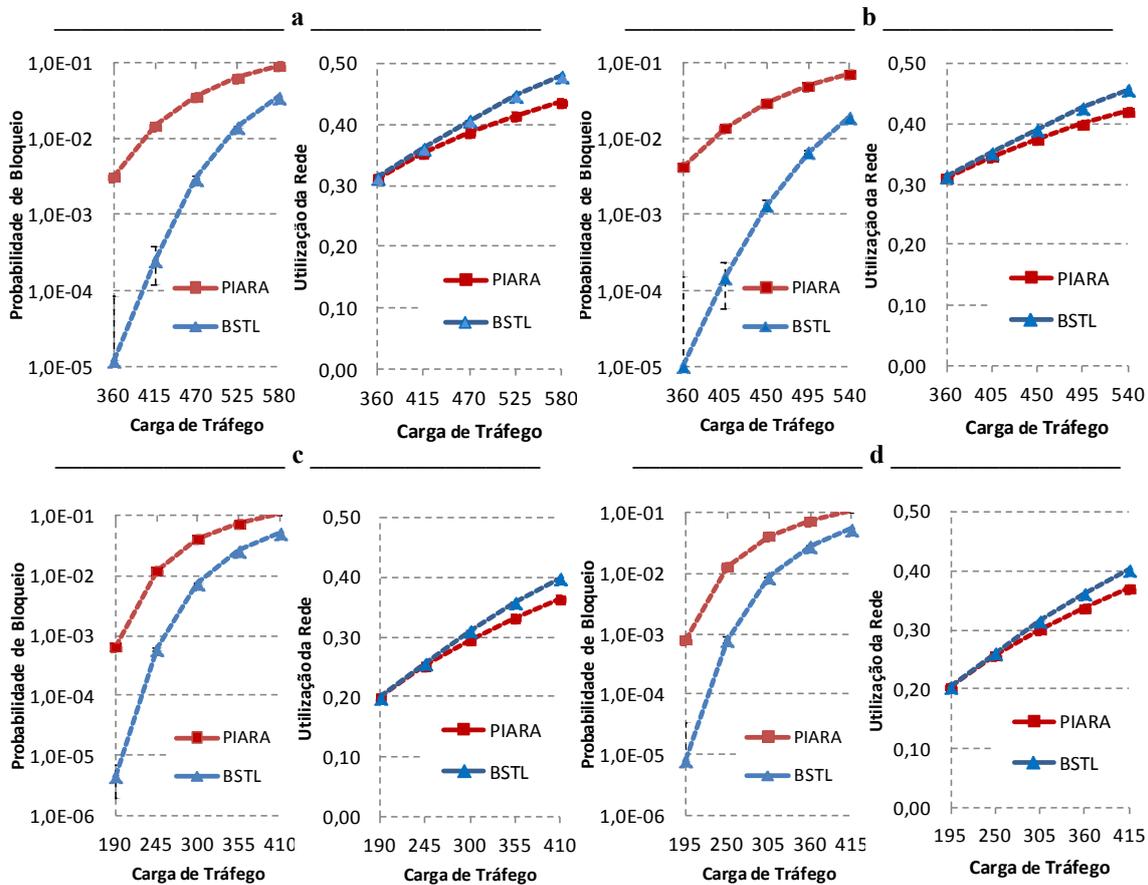


Figura 6. Probabilidade de Bloqueio e Utilização.

Os gráficos de utilização da rede (Fig. 6) também evidenciam o menor uso de recursos por parte do algoritmo PIARA. Isso ocorre porque o PIARA, apesar de utilizar rotas menores, não se compromete em balancear a utilização dos enlaces da rede. Isso transforma alguns enlaces em “gargalos” para o estabelecimento dos circuitos ópticos. De acordo com os nossos experimentos, o algoritmo PIARA subutiliza a rede, apresentando maior probabilidade de bloqueio e menor utilização.

## 5.2. Justiça no Atendimento das Requisições

A métrica de probabilidade de bloqueio reflete uma visão geral da probabilidade de sucesso no atendimento das requisições de circuito da rede óptica como um todo. Apesar de amplamente utilizada, a probabilidade de bloqueio média oculta as possíveis variações de atendimento quando avaliada para cada  $par(o,d)$  separadamente. Desta forma, outra métrica muito importante na avaliação de desempenho de redes ópticas é a métrica de justiça no atendimento das conexões ou, simplesmente, Justiça (*Fairness* [16]). Neste trabalho é utilizada a mesma equação utilizada em [16] para o cálculo da justiça:

$$Justiça = \frac{1 - \text{Max}(B_{p(o,d)})}{1 - \text{Min}(B_{p(o,d)})} \quad (2)$$

onde,  $B_{p(o,d)}$  representa a probabilidade de bloqueio do par  $p(o,d)$ . Com esta fórmula, é calculada a razão entre a probabilidade de bloqueio do  $par(o,d)$  com pior desempenho e a probabilidade de bloqueio do  $par(o,d)$  com melhor desempenho.

Os gráficos ilustrados na Figura 7 exibem o desempenho dos algoritmos PIARA e BSTL, em termos de Justiça em cada cenário estudado (Fig. 3). Nesses gráficos, nota-se o melhor desempenho do algoritmo BSTL em termos de justiça no atendimento das requisições de circuito óptico em todos os cenários avaliados, mesmo aumentando a carga de tráfego da rede. Tal comportamento é justificado pelo bom balanceamento de carga alcançado através do algoritmo BSTL.

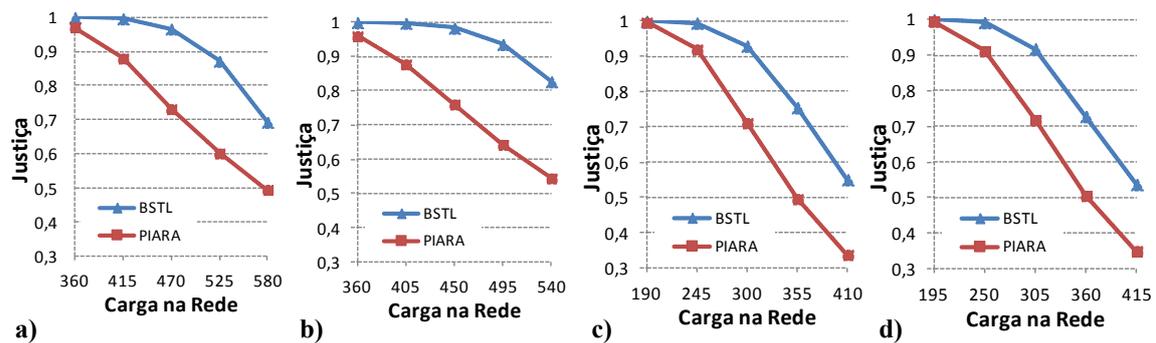


Figura 7. Justiça no Atendimento das Requisições.

## 6. Considerações Finais

Este trabalho apresentou uma reformulação do problema da escolha do menor caminho para redes ópticas translúcidas e propôs um algoritmo de roteamento adaptativo que considera ao mesmo tempo limitações da camada física óptica, cálculo de menores rotas e balanceamento dinâmico de carga. A estratégia proposta foi avaliada e comparada com outros algoritmos, possibilitando observar o seu desempenho superior em termos de utilização da rede, probabilidade de bloqueio e justiça no atendimento das requisições de conexões ópticas em redes ópticas translúcidas.

A Tabela 3 sintetiza as principais características dos algoritmos discutidos neste trabalho: BSR [1, 2], PIARA [8] e BSTL (algoritmo proposto).

Tabela 3. Comparação entre os algoritmos BSR, PIARA e BSTL.

CARACTERÍSTICA	BSR [1,2]	PIARA [8]	BSTL
Tipo de Rede Óptica	Transparente	Translúcida	Translúcida
Tipo de Roteamento	Fixo	Exaustivo	Adaptativo
Complexidade de implementação - Fase de Planejamento	Alta	Baixa	Baixa
Complexidade de implementação - Fase de Operação	Baixa	Alta	Média
Balanceamento de Carga	Sim (fixo)	Não	Sim
Ciente da Limitação da Camada Física Óptica	Não	Sim	Sim
Probabilidade de Bloqueio Esperada	-	Alta	Baixa
Justiça Esperada no Atendimento	-	Pouco Justo	Muito Justo

## Referências

- [1] G. M. Durães, *et al.* “The choice of the best among the shortest routes in transparent optical networks”, *Computer Networks*, v. 54, p. 2400-2409, 2010.
- [2] G. M. Durães, *et al.*, “A Escolha da Melhor entre as Menores Rotas em Redes Ópticas Transparentes”, in *Anais do 27º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, p. 1-14, 2009.
- [3] M. Gagnaire, e S. Zahr. “Impairment-Aware Routing and Wavelength Assignment in Translucent Optical Networks: State of the Art”. *IEEE Communication Magazine*, v. 47, n. 5, p. 55-61, Maio, 2009.
- [4] M. J. O'MAHONY *et al.* “Future Optical Networks”, *Journal Lightwave Technologies*, v. 24, p. 4684-4696, 2006.
- [5] G. Shen e R. S. Tucker. “Translucent Optical Networks: The Way Forward”. *IEEE Communications Magazine*, v. 45, n. 2, p. 48-54, Fevereiro, 2007.
- [6] H. C. Lin, S. W. Wang, e C. Tsai, “Traffic Intensity Based Fixed-Alternate Routing in All-Optical WDM Networks”, in *Proceedings of the IEEE ICC'2006*, Istanbul, Turquia, Junho, 11 – 15, 2006.
- [7] E. W. Dijkstra, “A Note on Two Problems in Connection with Graphs”, *Numerical Mathematics*, v. 1, p. 269–271, 1959.
- [8] P. Rajalakshmi e A. Jhunjhunwala, “Load Balanced Routing to Enhance the Performance of Optical Backbone Networks”, in *5th IFIP Int. Conf. on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN 2008)*, Surabaya, Indonesia, 2008.
- [9] F.A. Kuipers, *et al.*, “Impairment-aware Path Selection and Regenerator Placement in Translucent Optical Networks,” *Proc. of the 18th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP 2010)*, Kyoto, Japão, Outubro, 5-8, 2010.
- [10] K. Manousakis, *et al.* “Joint Online Routing, Wavelength Assignment and Regenerator Allocation in Translucent Optical Networks”, *Journal of Lightwave Technology*, v. 28, n. 8, p.1152-1163, Abril, 15, 2010.
- [11] S. Azodolmolky, *et al.* “A survey on physical layer impairments aware routing and wavelength assignment algorithms in optical networks”, *Computer Networks*, p. 926-944, Janeiro, 2009.
- [12] J. Strand e A. Chiu, “Impairments and Other Constraints on Optical Layer Routing,” RFC 4054, Maio, 2005.
- [13] S. Rai, C-F Su e B. Mukherjee, “On provisioning in all-optical networks: an impairment-aware approach”, In: *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 17, n. 6, p. 1989-2001, 2009.
- [14] A. Birman, “Computing Approximate Blocking Probabilities for a Class of All-optical Networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 14, n. 5, p. 852-857, Junho 1996.
- [15] A. C. B. Soares, G. M. Durães, W. Giozza e P. Cunha, “TONetS: Ferramenta para Avaliação de Desempenho de Redes Ópticas Transparentes” in *VII Salão de Ferramentas do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC*, Maio 2008.
- [16] A. C. B. Soares, *et al.* “Classification Strategy to Mitigate Unfairness in All-Optical Networks”, in *15th IEEE International Conference on Networks (ICON)*, Adelaide, p. 161-165, Janeiro, 2008.