

# TONetS: Simulador para Avaliação de Desempenho de Redes Ópticas Transparentes

André Soares<sup>1,2</sup>, Gilvan Durães<sup>1</sup>, William Giazza<sup>1</sup>, Paulo Cunha<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Pesquisas em Redes (GRO) – Ópticas – Universidade Salvador (UNIFACS)  
Salvador – BA – Brasil

<sup>2</sup>Centro de Informática (CIn) – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)  
Recife – PE - Brasil.

{andre.soares,giazza}@unifacs.br, gilvan.duraes@cc.unifacs.br,  
prfc@cin.ufpe.br

**Abstract.** *This work presents TONetS - Transparent Optical Network Simulator – a simulation tool for all-optical networking performance evaluation. Such tool may consider together in the same scenario, RWA algorithms, survivability techniques, wavelength converter placement schemes and different strategies for mitigating fairness. Besides, this work shows a case study using TONetS to compare three survivability techniques. Such comparison takes into account metrics such as blocking probability, restorability, network utilization and blocking probability due to absence of resource in the backup route.*

**Resumo.** *Este artigo apresenta o TONetS (Transparent Optical Network Simulator) uma ferramenta para avaliação de desempenho de redes ópticas transparentes. TONetS permite considerar em um mesmo cenário o estudo de algoritmos RWA, técnicas de sobrevivência, estratégias de posicionamento de conversores de comprimentos de onda e políticas para tentar minimizar injustiças no atendimento das conexões ópticas. Além disso, neste trabalho é apresentado um estudo de caso utilizando a ferramenta TONetS para comparar três estratégias de sobrevivência em redes ópticas transparentes. Esse estudo comparativo analisa métricas tais como, probabilidade de bloqueio, nível de restauração, utilização da rede e probabilidade de bloqueio por ausência de recursos na rota de backup.*

## 1. Introdução

A multiplexação de comprimentos de onda WDM - *Wavelength Division Multiplexing* é uma tecnologia que permite utilizar melhor a banda passante das fibras ópticas. Dentro de uma única fibra, são estabelecidos, simultaneamente, múltiplos canais ópticos que operam em diferentes comprimentos de onda. Cada comprimento de onda pode atingir atualmente taxas de transmissão da ordem de 40 Gbps [1]. Esses canais ópticos podem ser modulados de forma independente com o objetivo de acomodar dados em diferentes formatos e taxas de transmissão.

Em redes ópticas WDM transparentes, a comutação de comprimentos de onda é realizada no domínio óptico eliminando os conversores OEO (Óptico-Eletró-Óptico) e suas limitações. As informações dos usuários da rede óptica são roteadas da origem até

o destino com base nos comprimentos de onda associados aos canais ópticos. Por isso esse tipo de rede óptica é também conhecido como rede óptica WDM roteada por comprimento de onda. Para transportar informações entre clientes de uma rede óptica transparente, uma conexão precisa ser estabelecida na camada óptica. A conexão óptica entre um nó origem  $o$  e um nó destino  $d$  é chamada de caminho óptico (*lightpath*).

Para estabelecer um caminho óptico é necessário alocar e rotear um comprimento de onda para cada enlace da rota definida. Este problema é conhecido como o problema de roteamento e alocação de comprimento de onda (*Routing and Wavelength Assignment* - RWA). Após o estabelecimento da conexão, os comprimentos de onda alocados na rota selecionada ficam reservados exclusivamente ao caminho óptico até a finalização da conexão. Com o propósito de melhor utilizar os recursos de uma rede óptica sob tráfego dinâmico, as estratégias RWA têm como objetivo atender as requisições de caminhos ópticos ( $o,d$ ) minimizando a probabilidade de bloqueio de futuras conexões [2].

Sob tráfego dinâmico as conexões ópticas são estabelecidas e finalizadas dinamicamente, de acordo com as requisições dos clientes da rede óptica. Isto significa que a demanda de conexões ópticas pode ser bem superior à capacidade da rede óptica em termos de enlaces ópticos (fibras e comprimentos de onda). No RWA sob tráfego dinâmico, os algoritmos devem apresentar baixa complexidade computacional, uma vez que as escolhas das rotas e dos comprimentos de onda serão feitas em tempo de execução [2]. Neste artigo será tratado o problema RWA dinâmico, mais compatível com os requisitos de flexibilidade das modernas redes de transporte ópticas.

No estudo e dimensionamento de redes ópticas transparentes, o problema RWA deve ser tratado em conjunto com outras questões fundamentais como: dimensionamento e posicionamento de conversores de comprimento de onda, nível de sobrevivência dos caminhos ópticos, nível de justiça (*fairness*) no atendimento dos caminhos ópticos, etc

Este artigo apresenta o TONetS, uma ferramenta para avaliação de desempenho de redes ópticas transparentes que permite considerar em um mesmo cenário diferentes algoritmos RWA, estratégias de sobrevivência e técnicas de posicionamento de conversores de comprimentos de onda.. A ferramenta TONetS permite também que se considere diferentes condições de tráfego, utilizando topologias genéricas.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta alguns dos principais problemas (técnicas de sobrevivência, estratégias de posicionamento de conversores de comprimentos de onda e políticas para tentar minimizar injustiças no atendimento das conexões ópticas ) que podem ser considerados em conjunto com o problema RWA com o objetivo de se ter um modelo de simulação mais próximo de um cenário real. A Seção 3 apresenta a modelagem de rede óptica transparente. A ferramenta TONetS é descrita na Seção 4. Na Seção 5 é feito um estudo de caso com a ferramenta TONetS e as conclusões são apresentadas na última Seção.

## 2. Problemas tratados em conjunto com o Problema RWA

### 2.1 Posicionamento de Conversores de Comprimento de Onda

Em redes WDM típicas, um caminho óptico deve utilizar o mesmo comprimento de onda em todos os enlaces da rota especificada. Esta propriedade é conhecida como

continuidade obrigatória de comprimento de onda [2]. Por outro lado, redes WDM com capacidade de conversão de comprimento de onda nos seus nós permitem superar essa restrição. Conversores de comprimento de onda (WC - *Wavelength Converter*) são dispositivos localizados nos nós da rede, com a função de realizar a conversão de um comprimento de onda de entrada em um comprimento de onda de saída diferente. Dessa forma, com o uso de WCs, um caminho óptico pode ser formado por comprimentos de onda diferentes, em diferentes enlaces. Em redes WDM desse tipo, um nó com capacidade de conversão é chamado de roteador com conversão de comprimento de onda - *Wavelength Convertible Router* – WCR [3].

Uma rede WDM é dita com capacidade de conversão total quando qualquer caminho óptico pode desrespeitar a propriedade de continuidade obrigatória de comprimento de onda ao longo de todo o caminho óptico. Essa característica representa o limite inferior em termos de probabilidade de bloqueio para uma rede óptica WDM sob tráfego dinâmico. Embora a utilização de WCs seja favorável ao desempenho de uma rede óptica, o seu elevado custo atual acaba inviabilizando a implantação de redes ópticas com conversão total. Por isso, torna-se importante a busca de arquiteturas de redes ópticas WDM onde o número de WCs seja minimizado sem o comprometimento do desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio, alcançado em uma rede óptica com conversão total. Portanto, o objetivo de uma estratégia de posicionamento de conversores é distribuir um número limitado de WCs de forma que o desempenho da rede em termos de probabilidade de bloqueio se aproxime ao máximo do cenário com conversão total. Um estudo detalhado sobre as arquiteturas de conversão de comprimento de onda pode ser encontrado em [4].

## 2.2 Sobrevivência em Redes Ópticas Transparentes

As redes ópticas transparentes permitem transportar grandes volumes de informações e fornecer serviços para aplicações que exigem requisitos de qualidade de serviço como, por exemplo, tempo máximo de atraso. Além da alta sensibilidade ao atraso, essas aplicações geralmente funcionam 24 horas por dia exigindo uma alta disponibilidade de serviços da rede. A falha de um enlace ou de um nó representa a interrupção de todos os caminhos ópticos que atravessam os componentes falhos. Isto pode provocar a perda de uma grande quantidade de informações e a parada de serviços críticos. Diante disso, as redes ópticas transparentes precisam de mecanismos para garantir que falhas de equipamentos e fibras sejam recuperadas de maneira rápida e eficiente. Esta capacidade de continuar operando na eventualidade de ocorrência de falhas é conhecida como sobrevivência em redes ópticas transparentes [5].

Sobrevivência em redes ópticas é tipicamente classificada em estratégias de proteção ou restauração [6]. A proteção é uma estratégia pró-ativa que consiste na reserva prévia (i.e., antes da ocorrência de falhas) de recursos redundantes que somente serão utilizados para recuperar uma eventual falha. Na estratégia de restauração não é feita a reserva prévia de recursos redundantes. De forma reativa, depois da detecção da falha, as estratégias de restauração tentam alocar recursos disjuntos da falha com o objetivo de garantir a sobrevivência. As estratégias de proteção e restauração podem ser baseadas no caminho, no enlace ou no sub-caminho. A classificação e as principais técnicas de sobrevivência em redes ópticas transparentes podem ser encontradas em [5-9].

### 2.3 Nível de Justiça no Atendimento dos Caminhos Ópticos

A maioria dos estudos de avaliação de desempenho de algoritmos tem utilizado especialmente a probabilidade de bloqueio como métrica de avaliação. Esta medida indica a probabilidade de bloqueio ( $BP$ ) para uma dada requisição de conexão óptica (caminho óptico) gerada aleatoriamente. Para uma topologia de rede com  $N$  nós existem  $N.(N-1)$  combinações de pares (origem, destino). A probabilidade de bloqueio média para um par com nó origem  $o$  e nó destino  $d$  ( $BP_{(o,d)}$ ) depende da rota escolhida para atender tal conexão, do número de saltos da rota e do nível de utilização dos enlaces da rota. Isto significa que diferentes pares de nós (origem, destino) podem ter probabilidades de bloqueio muito diferentes. Essa característica pode ser considerada um serviço prestado de forma injusta. Esse problema é conhecido como problema de justiça (*fairness problem*) [10].

Em [11] os autores mostram que é esperado que requisições com rotas longas (e.g. 4 ou 5 saltos) sofram maior probabilidade de bloqueio do que requisições com rotas curtas (e.g. 1 ou 2 saltos). O tamanho da conexão óptica (número de saltos da rota utilizada) pode variar com a topologia da rede, isto é, alguns pares de nós (origem, destino) podem usar rotas longas enquanto outros usam rotas curtas.

Para tentar minimizar a injustiça no atendimento dos pares de nós (origem, destino) são utilizadas técnicas que classificam os pares de nós (origem, destino) e reservam intervalos de comprimentos de onda (*wavebands*) para as classes com maiores valores de probabilidade de bloqueio. As principais técnicas para tentar minimizar atendimento injusto em redes ópticas transparentes podem ser encontradas em [11-13].

### 3. Modelagem de Redes Ópticas Transparentes

Uma rede óptica é formada de nós ópticos interligados por fibras ópticas formando uma determinada topologia. Os nós ópticos adjacentes são interconectados por enlaces ópticos. Enlaces ópticos são compostos por fibras ópticas. Neste modelo, um enlace óptico pode ser classificado em unidirecional ou bidirecional. No enlace unidirecional, somente uma fibra óptica é utilizada em um único sentido. Já no enlace bidirecional existem duas fibras ópticas, uma fibra para cada sentido. Todo enlace possui um custo que será utilizado pelos algoritmos de roteamento na escolha do caminho de menor custo.

A topologia da rede óptica pode ser representada pelo grafo  $G(N,E)$ , onde  $N=\{n_i \mid 1 \leq i \leq N\}$  é o conjunto de nós ópticos,  $E=\{e_{\{i,j\}} \mid i,j \in N\}$  é o conjunto de enlaces. O conjunto das possíveis conexões (*caminho ópticos*) é dado por  $C=\{c(i,j) \mid 1 \leq i \leq N \wedge 1 \leq j \leq N \wedge i \neq j\}$ . Todo enlace  $e_{\{i,j\}}$  possui um conjunto com  $W$  comprimentos de onda  $W=\{w_i \mid 1 \leq i \leq W\}$ .

Sendo os nós  $o$  e  $d$  pertencentes a  $N$ , para o estabelecimento da conexão  $c(o,d)$  (do nó origem  $o$  até o nó destino  $d$ ) é necessário escolher uma rota  $R_{(o,d)}$ . A rota  $R_{(o,d)} \subset E$  e representa um caminho através do grafo  $G(N,E)$  que liga o nó  $o$  ao nó  $d$ .  $R(o,d)$  é escolhida pelo algoritmo de roteamento. Depois da escolha da rota um algoritmo de alocação de comprimento de onda será executado para alocar um comprimento de onda  $w_i$  disponível em todos os enlaces de  $R(o,d)$ . O comprimento de onda  $w_i$  não poderá ser utilizado por outras conexões nos enlaces da rota  $R_{(o,d)}$  até a finalização da conexão  $c(o,d)$ . Na ausência de conversores de comprimento de onda o mesmo comprimento de

onda  $w_i$  deve ser alocado em todos os enlaces da rota  $R_{(o,d)}$  alocada para o estabelecimento da conexão óptica  $c(o,d)$ .

A chegada de requisições é um processo de Poisson com taxa média  $\lambda$  e o tempo de retenção médio é distribuído exponencialmente com média  $1/\mu$ . Após a chegada de uma requisição de conexão  $c(o,d)$  a mesma será estabelecida se houver pelo menos um comprimento de onda livre em todos os enlaces da rota selecionada. Caso contrário a conexão será bloqueada. Todas as requisições bloqueadas são descartadas.

O estabelecimento de uma conexão óptica pode ainda ser feito desrespeitando a propriedade de continuidade obrigatória de comprimento de onda com o uso de conversores de comprimentos de onda. Para isso é necessário definir quais nós terão capacidade de conversão (WCR) e quantos WC cada nó terá. A Figura 1 ilustra a arquitetura de um WCR com um banco de WCs compartilhado. Esta estrutura tem como objetivo o compartilhamento de WCs entre todas as portas de entrada do comutador. O banco de conversores pode ser utilizado para converter um sinal óptico de qualquer enlace de entrada para qualquer enlace de saída.

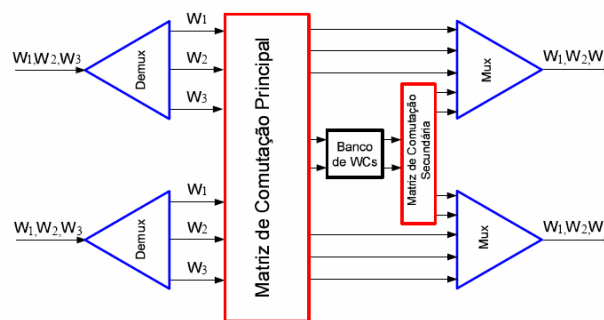


Figura 1 – Arquitetura de um nó óptico WCR compartilhando um banco de conversores.

As requisições de conexões podem ser distribuídas espacialmente segundo dois tipos de tráfego: uniforme ou não uniforme. No tráfego uniforme, todas as conexões são escolhidas uniformemente, sem depender do número de enlaces que formam a requisição de conexão (número de saltos). No tráfego não uniforme a probabilidade de uma requisição ser gerada é função dos pesos definidos para cada par de nós (origem, destino).

Falhas são geradas para a avaliação de desempenho das estratégias de sobrevivência em redes ópticas. A ocorrência de falhas também foi modelada como um processo de Poisson com taxa média  $\lambda_f$  e o tempo médio de reparação da falha é distribuído exponencialmente com média  $1/\mu_f$ . As falhas são distribuídas uniformemente entre todos os enlaces. A relação entre  $\lambda_f$  e  $1/\mu_f$  segue a seguinte estatística. Em média, a quebra de fibras ocorre a uma taxa de 4,39 vezes a cada 1609 Km de extensão durante um ano e o tempo médio para reparação de uma fibra é de 12 horas [5]. Com o objetivo de gerar um número suficiente de falhas de enlaces em nossas simulações, nós aumentamos a taxa de geração de falha e diminuimos proporcionalmente o tempo de reparação da falha. Tal simplificação também é utilizada em [6].



Abaixo segue a lista das principais métricas que podem ser compostas ou analisadas individualmente para a avaliação de desempenho de projetos de redes ópticas transparentes utilizando a ferramenta TONetS.

**Probabilidade de bloqueio total de conexões** – O cálculo da probabilidade de bloqueio total é feito segundo a equação  $PB = NRB / NRG$ , onde  $NRB$  é o número de requisições bloqueadas e  $NRG$  é o número de requisições geradas.

**Probabilidade de bloqueio por ausência de *backup*** – métrica aplicada a estratégias de sobrevivência, dada por  $PBb = NRBb / NRG$ , onde  $NRBb$  é número de requisições bloqueadas por ausência de recursos disponíveis na a rota de *backup*.

Uma conexão é bloqueada por ausência de *backup* quando há recursos disponíveis para a rota primária para atender à conexão, porém não existem recursos disponíveis para serem reservados para a rota de *backup*.

**Utilização média da rede** – A utilização média da rede ( $UMR$ ) é calculada segundo a equação:

$$UMR = \frac{\sum_{i=1}^{NRG} UR_i}{NRG},$$

onde  $UR_i$  é a utilização da rede antes de atender a  $i$ -ésima requisição de conexão. O cálculo de  $UR_i$  é dado por:

$$UR_i = \frac{\sum_{k=1}^{Nenl} Uenl_k}{Nenl},$$

onde a utilização do  $k$ -ésimo enlace de fibra é dado por  $Uenl_k = NWO_k / W_k$ . O número de comprimentos de onda utilizados em um dado instante pelo  $k$ -ésimo enlace é representado por  $NWO_k$ .

**Nível de restauração** – o nível de restauração ( $RTB$ ) é a probabilidade média de uma conexão permanecer ativa em meio à falha de um enlace. A  $RTB$  é calculada da seguinte forma:

$$RTB = \frac{\sum_{i=1}^{Nfal} RTB_i}{Nfal},$$

onde  $Nfal$  é o número de ocorrências de falhas e  $RTB_i$  é o nível de restauração da rede após a ocorrência da  $i$ -ésima falha. Considerando o número de conexões que utilizam o enlace falho ( $Ncef$ ) e o número de requisições sem a capacidade de superar tal falha ( $Ncsrf$ ), o cálculo de  $RTB_i$  é dado por:

$$RTB_i = 1 - \frac{Ncaf_i}{Ncsrf_i}$$

**Tamanho médio das requisições atendidas** – o tamanho de uma requisição é dado pelo número de enlaces (número de saltos) que a requisição utiliza. O  $TRA$  é calculado segundo a equação:

$$TRA = \frac{\sum_{i=1}^{NRA} TRA_i}{NRA},$$

sendo  $TRA_i$  o tamanho da  $i$ -ésima requisição atendida e  $NRA$  o número de requisições atendidas.  $NRA$  é o número de requisições atendidas.

**Tamanho médio das requisições bloqueadas** – o cálculo é análogo ao cálculo do tamanho médio das requisições atendidas, substituindo requisição atendida por requisição bloqueada.

**Utilização por enlace** – para cada enlace da rede, exibe a utilização média deste enlace (enlace ida e volta, se o enlace for bidirecional). A utilização média de um enlace  $UME$  é calculada segundo a equação:

$$UME = \frac{\sum_{i=1}^{NRG} UE_i}{NRG},$$

onde  $UE_i$  é a utilização do enlace antes de atender a  $i$ -ésima requisição de conexão e é dado por  $UE_i = NWUi / W$ . A grande maioria dos trabalhos da literatura relacionada assume que todos os enlaces possuem o mesmo número de comprimento de onda. Também assumimos essa simplificação nesta modelagem, isto é, todo enlace possui  $W$  comprimentos de onda.

**Rotas por enlace** – para todos os enlaces da rede (ida e volta, caso o enlace seja bidirecional), são computadas todas as rotas que utilizam o respectivo enlace.

**Número de falhas por enlace** – fornece o número de ocorrências de falhas para cada enlace da rede.

**Número de requisições por par (origem, destino)** – mostra o número de requisições geradas para cada par (origem, destino).

**Probabilidade de bloqueio por par** –  $PB_{(o,d)}$ , mede a probabilidade bloqueio média para cada par (origem, destino) individualmente.

#### 4. TONETS

O TONetS (*Transparent Optical Network Simulator*) é um simulador para avaliação de desempenho de redes ópticas transparentes. Ele foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação JAVA. Tal escolha é justificada por características importantes dessa linguagem de programação como: portabilidade, orientação a objetos além de possuir uma grande variedade de bibliotecas disponíveis e bem documentadas. O TONetS foi inspirado na ferramenta SimRWA [14] concebida para estudos de algoritmos de alocação e roteamento em redes ópticas transparentes. O SimRWA foi desenvolvido inicialmente para avaliar apenas o desempenho de algoritmos de alocação e roteamento de comprimento de onda. Na versão 2.0 do SimRWA foram adicionadas algumas funcionalidades que permitiam avaliar de maneira ainda limitada (apenas em termos de probabilidade de bloqueio média da rede e utilização média da rede) algumas técnicas de proteção dedicada de caminho óptico e alguns cenários específicos de redes WDM com conversão de comprimento de onda.

Com o TONetS agora é possível modelar e avaliar o desempenho de redes ópticas transparentes que consideram conjuntamente no mesmo cenário, soluções para o problema RWA, para sobrevivência (técnicas de proteção e restauração), para dimensionar e distribuir conversores de comprimento de onda e para reduzir injustiças no atendimento de conexões. Além disso, a ferramenta TONetS foi projetada de forma flexível, permitindo extensões através da implementação de novas características voltadas ao projeto e dimensionamento de redes ópticas transparentes. Outra funcionalidade que merece destaque na ferramenta TONetS é a sua capacidade de agendar um conjunto de simulações a serem realizadas em série.

A seguir são listadas todas as técnicas implementadas na ferramenta.

Algoritmos de alocação de comprimento de onda [2]:

1. *First-Fit*,
2. *Random*,
3. *Most Used*,
4. *Least Used*,
5. *Max-Sum* e
6. *RCL*.

Tipos de roteamento:

1. Fixo
  - a. Menor custo computado *off-line* com algoritmo de dijkstra
  - b. Conjunto de rotas definidas manualmente
2. Fixo Alternativo
  - a. Rotas ordenadas pelo menor caminho
3. Adaptativo
  - a. *Least Loaded Routing* - LLR.

Técnicas de sobrevivência:

1. Proteção
  - a. Proteção dedicada de caminho [7]
    - i. *Two Step*
    - ii. *Two Step* com *backtracking*
    - iii. *One Step*
2. Restauração
  - a. Restauração de caminho [9]
    - i. Restauração
    - ii. *Pre-Computed Restoration*.



3. *Adaptive Survivability* - ADPS. Esta é uma técnica de sobrevivência que se adapta entre a restauração e a proteção proposta em [15].

Técnicas de posicionamento de conversores de comprimento de onda:

1. FLP – *First Load Priority* [14];
2. TOT – *Total Outgoing Traffic* [13];
3. *Adaptive FLP* [17].

Estratégias de justiça

1. ClaServ [11].

## VALIDAÇÕES

Com o objetivo de validar a ferramenta de simulação foram realizados vários testes de verificação (análise de traces) e validações parciais através de comparações com resultados de modelos analíticos e resultados de simulação de outros trabalhos.

As Figuras 2 e 3 exemplificam alguns dos experimentos realizados com o objetivo validar parcialmente a ferramenta TONetS. A Figura 2a apresenta os resultados de probabilidade de bloqueio calculados com o modelo analítico apresentado em [19] e os resultados simulados com o TONetS para a topologia da Figura 2b. A topologia tem 4 WCRs cada um deles com 3 WCs.

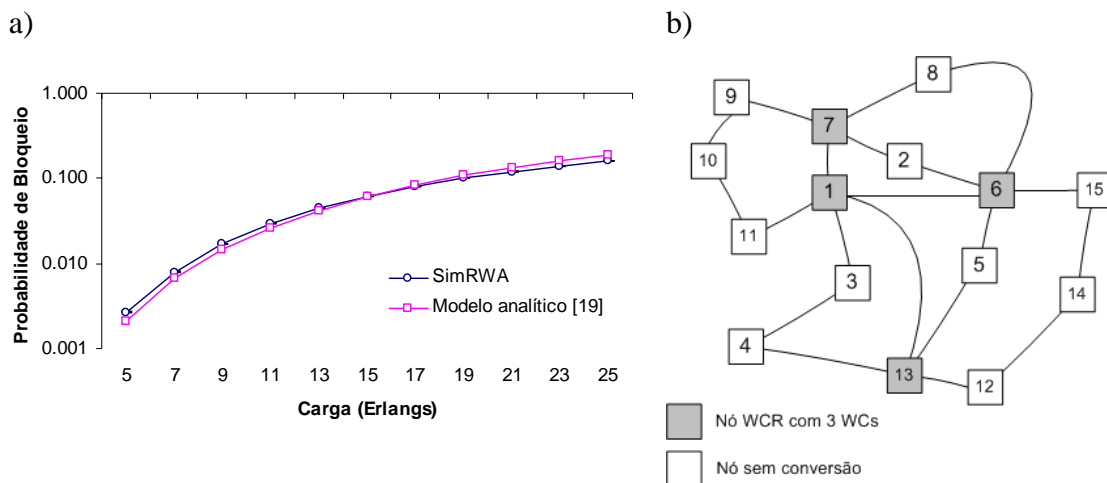


Figura 2 – a) Resultados do modelo analítico apresentado em [19] e da ferramenta TONetS. b) Topologia utilizada na validação.

A Figura 3 compara resultados do TONetS com os resultados apresentados em [18] em termos de probabilidade de bloqueio utilizando a topologia da NSFnet (16 nós) aplicando proteção dedicada de caminho.

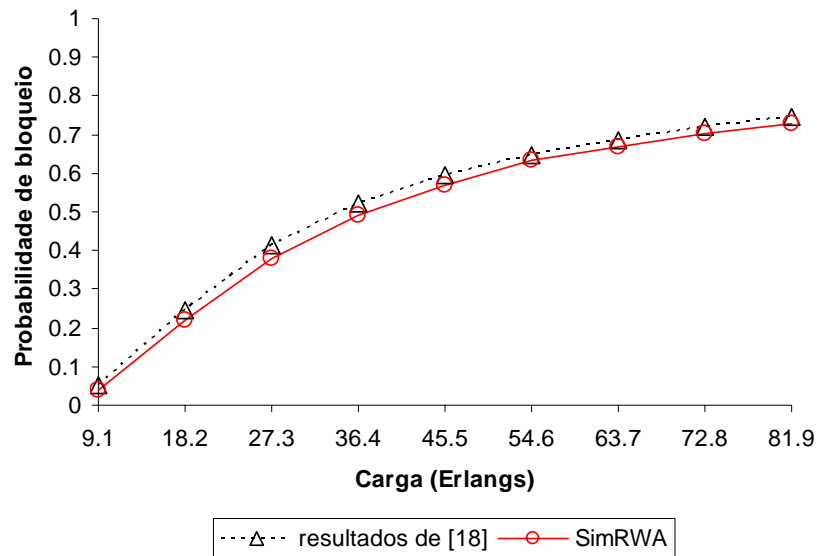


Figura 3 – Comparação de resultados apresentados em [18] e os obtidos com TONetS.

## 5. Estudo de caso utilizando a Ferramenta TONetS

Nesta seção é apresentado um estudo de caso [16] com o objetivo de ilustrar o potencial da ferramenta TONetS. Neste estudo foi assumido um tráfego dinâmico e uniforme. As simulações foram realizadas utilizando as topologias das redes Abilene e EON (Fig. 4a e 4b). Todos os enlaces são bidirecionais (um par de fibras) com 40 comprimentos de onda para cada sentido.

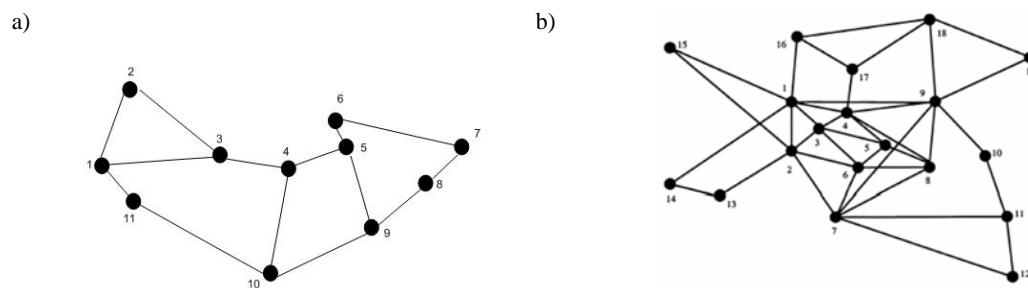


Figura 4 – a) Topologia da rede Abilene e b) topologia da rede EON – *European Optical Network*.

O algoritmo *First-Fit* [2] é utilizado para fazer a alocação de comprimento de onda. Para cada simulação são realizadas 10 replicações com diferentes sementes de geração de variável aleatória. São geradas 100000 requisições para cada replicação. Os resultados mostram os intervalos de confiança calculados com um nível de confiança de 95%.

A geração de falha nos enlaces segue as estatísticas apresentadas em [5]. É assumido que o comprimento médio dos enlaces é de 142 Km para a topologia EON e de 971,4 Km para a topologia da rede Abilene. Após a geração de falha em um enlace, a capacidade de restauração é calculada dividindo o número de conexões afetadas pelo número de conexões que tiveram sucesso na restauração da falha.

O objetivo desse estudo de caso é avaliar o desempenho de três estratégias de sobrevivência: *Two Step* com *Backtracking* (TSB), *Pre-Computed Restoration* (PCR) e *Adaptive Survavability* (ADPS).

A estratégia ***Two Step with Backtracking* (TSB)** computa no primeiro passo a rota de menor caminho para a rota primária. No segundo passo é computada a rota de *backup* disjunta da rota primária. O *backtracking* evita que a escolha de uma rota primária inviabilize a computação de uma rota de *backup* disjunta da rota primária. Depois disso é estabelecida a conexão na rota primária e os recursos da rota de backup ficam reservados para serem utilizados na ocorrência de falhas. É assumido que a técnica TSB será usada para implementar proteção 1:1. Neste caso, os recursos redundantes apesar de reservados poderão ser utilizados para atender usuários sem exigências de sobrevivência [6]. Isto significa que, quando for necessário utilizar os recursos redundantes para recuperar uma falha, o serviço dos usuários sem sobrevivência será interrompido. Apesar desta vantagem, a proteção 1:1 gera uma penalidade no tempo de restauração da falha.

Na estratégia ***Pre-Computed Restoration* (PCR)** após a chegada de uma requisição o caminho óptico é estabelecido utilizando a rota de menor caminho. Uma rota de restauração (*backup*) é computada previamente utilizando o conceito *backtracking*. Dessa forma, TSB e PCR computam o mesmo par de rotas (trabalho, *backup*). Entretanto, apesar da PCR pré-computar a rota de *backup* não existe a reserva prévia dos recursos da rota de restauração, diferentemente do que acontece no TSB que reserva os recursos da rota de *backup*. Portanto, a estratégia PCR não pode garantir o nível de restauração da conexão óptica uma vez que os recursos da rota de *backup* podem estar sendo utilizados por outras conexões no momento da falha.

A estratégia ***Adaptive Survivability* (ADPS)** tem como principal característica permitir um equilíbrio de desempenho entre as estratégias de proteção (TSB) e restauração (PCR). A idéia básica da estratégia ADPS proposta em [16] é utilizar PCR sob baixa utilização da rede e utilizar TSB quando a utilização da rede for maior. Esse comportamento adaptativo é implementado segundo um parâmetro de adaptação **C**. Isto é, se a utilização da rede for maior do que **C** a estratégia TSB será utilizada, caso contrário PCR será aplicado. Apesar da técnica *Adaptive Survivability* ser implementada neste estudo utilizando *Two Step with Backtracking* e *Pre-Computed Restoration* como referências, ela pode ser aplicada para fazer adaptações entre outras técnicas de proteção e restauração

A Figura 5 apresenta o desempenho das estratégias TSB, PCR e ADPS (**C**=50%) para a topologia da rede Abilene em termos de probabilidade de bloqueio (Fig. 5a), capacidade de restauração (Fig. 5b), probabilidade de bloqueio por ausência de recurso na rota de backup (Fig. 5c) e utilização média da rede (Fig. 5d).

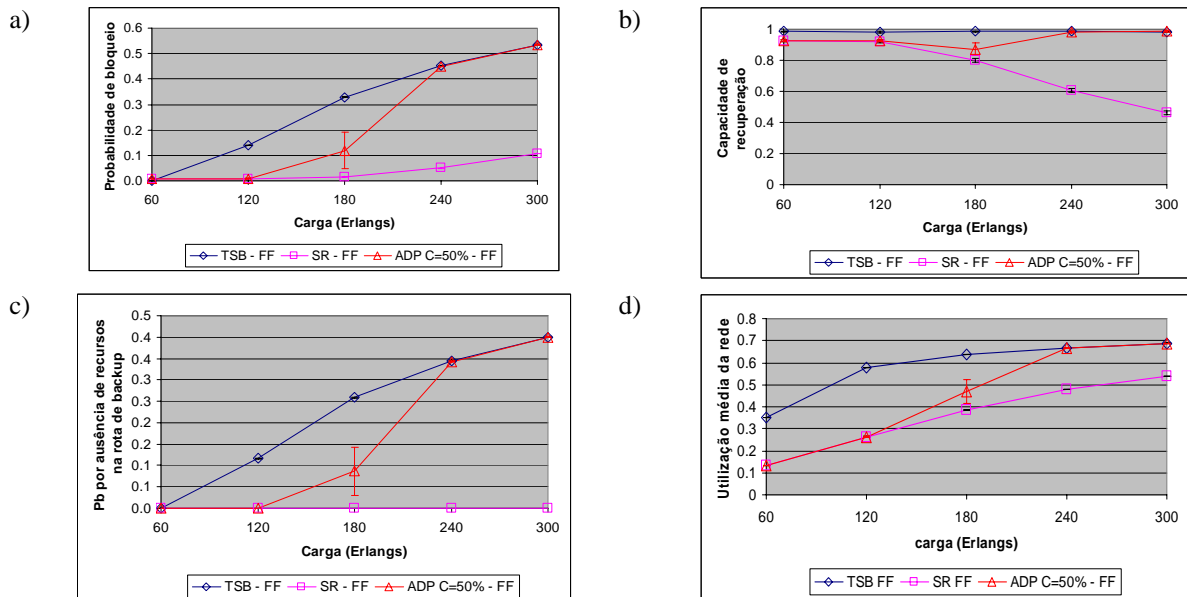


Figura 5 – Probabilidade de bloqueio, capacidade de restauração, probabilidade de bloqueio por ausência de recurso na rota de *backup* e utilização média da rede aplicando as estratégias TSB, PCR e ADPS (C=50%) para a topologia da rede Abilene.

É possível observar que para todas as três estratégias de sobrevivências, a probabilidade de bloqueio cresce devido à uma maior utilização de recursos em consequência do aumento da carga da rede (Figuras 5a e 5d). A Figura 5d mostra que a alocação prévia de recursos redundantes ocasiona um crescimento muito rápido da utilização da rede pela estratégia TSB. Isto causa um desempenho inferior da estratégia TSB, em termos de probabilidade de bloqueio, quando comparada com as outras estratégias. A estratégia ADPS apresenta um desempenho mais balanceado quando comparado com as estratégias TSB e PCR. De maneira geral, a estratégia ADPS, sob os mesmos parâmetros de carga, apresenta um crescimento intermediário da probabilidade de bloqueio mantendo uma capacidade de restauração superior a 87%. A Figura 6 mostra a probabilidade de bloqueio por par de nós (*o, d*) sob uma carga de 300 Erlangs utilizando a estratégia ADPS.

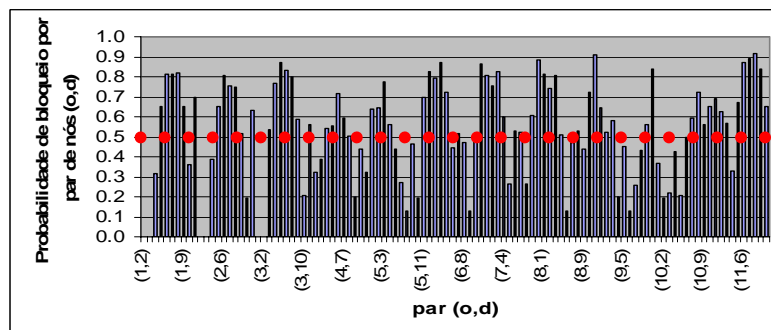


Figura 6 - Probabilidade de bloqueio por par de nós (*o, d*) na topologia da rede Abilene utilizando ADPS sob um carga de 300 Erlangs.

Analisando a Figura 6, é possível notar que o atendimento das requisições de conexões (*o, d*) é feito de maneira desigual. A reta pontilhada paralela ao eixo x indica a

probabilidade de bloqueio geral em função de uma carga de 300 Erlangs, apresentada anteriormente na (Figura 5a). É fácil perceber que, mesmo sob uma distribuição uniforme de carga, um grupo de pares de nós (**o,d**) obteve probabilidade de bloqueio praticamente igual a zero enquanto um outro grupo obteve probabilidade de bloqueio superior a 80%. Dessa forma, a análise exclusivamente da probabilidade de bloqueio geral não indica se o atendimento das conexões é feito de forma justa. O comportamento injusto com relação ao atendimento dos pares (**o,d**) foi observado para todas as estratégias TSB, PCR e ADPS sob diferentes intensidades de tráfego. Entretanto, é importante salientar que sob cargas muito altas e muito baixas existe uma tendência de justiça com relação a probabilidade de bloqueio por par de nós (**o,d**). Isto porque a probabilidade de bloqueio geral tende a valores próximos de 0 ou 1.

A Figura 7 mostra o desempenho das estratégias TSB, PCR e ADPS com a utilização da topologia da rede EON sob as mesmas métricas de avaliação da Figura 5.

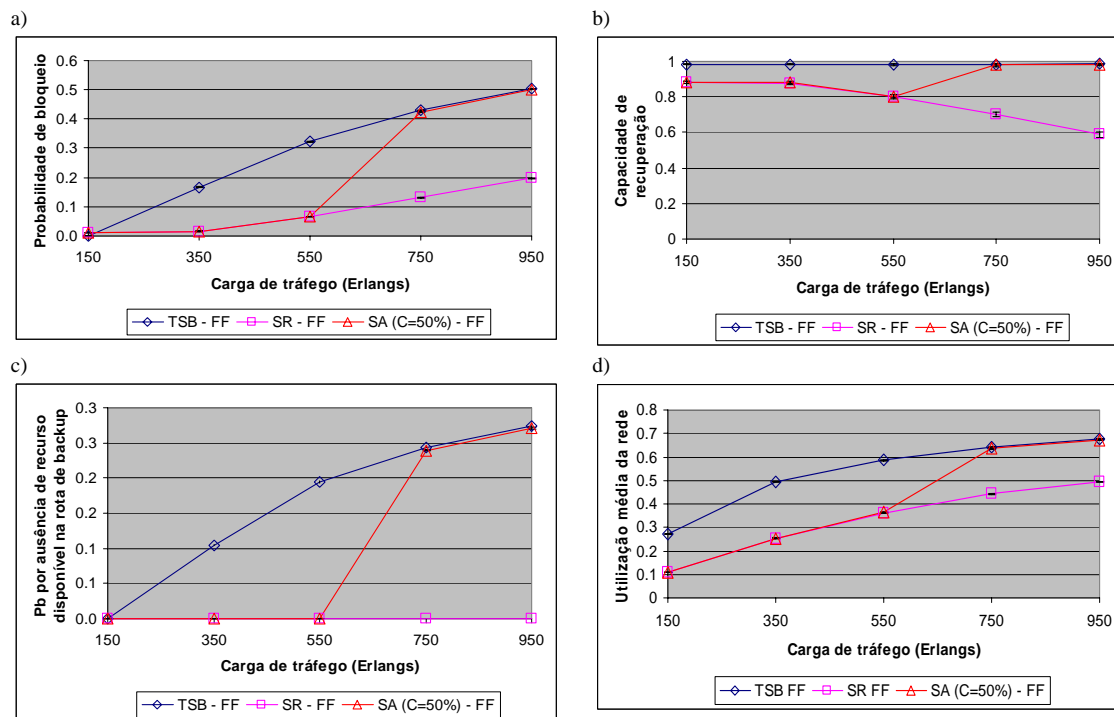


Figure 7 – Probabilidade de bloqueio, capacidade de restauração, probabilidade de bloqueio por ausência de recurso na rota de *backup* e utilização média da rede aplicando as estratégias TSB, PCR e ADPS para a topologia da rede EON.

Os resultados obtidos com as estratégias TSB, PCR e ADPS utilizando a topologia da rede EON (probabilidade de bloqueio, capacidade de restauração, probabilidade de bloqueio por ausência de recurso na rota de *backup* e utilização média da rede) apresentaram os mesmos comportamentos dos resultados aplicados a topologia da rede Abilene. Isto mostra que o comportamento observado não é dependente da topologia, pelo menos quando comparamos as topologias das redes Abilene e EON. Ainda observando os resultados de simulação para as duas topologias estudadas notamos que uma parcela significativa dos bloqueios da estratégia TSB acontece por ausência de recursos livre na rota de *backup*. Isto acontece porque a estratégia TSB somente atende

uma requisição se for possível reservar os recursos nas duas rotas (primária e *backup*). Em compensação, todas as requisições atendidas com o uso da estratégia TSB possuem uma capacidade de restauração muito próxima de 100%.

As figuras 8 e 9 apresentam a utilização média por enlace das topologias de redes Abilene e EON, respectivamente. Em ambos os gráficos a utilização média da rede é evidenciada por uma reta pontilhada paralela ao eixo x.

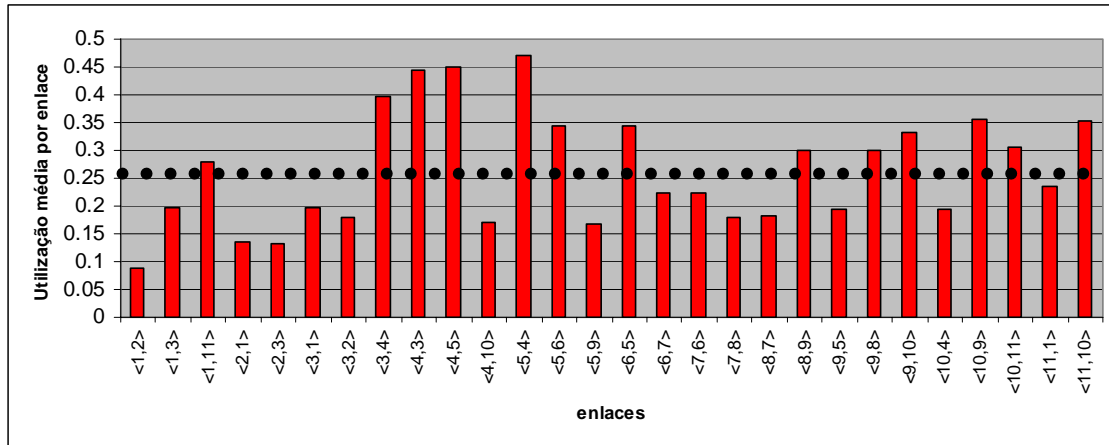


Figure 8 – Utilização média dos enlace na topologia da rede Abilene utilizando ADPS sob um carga de 120 Erlangs.

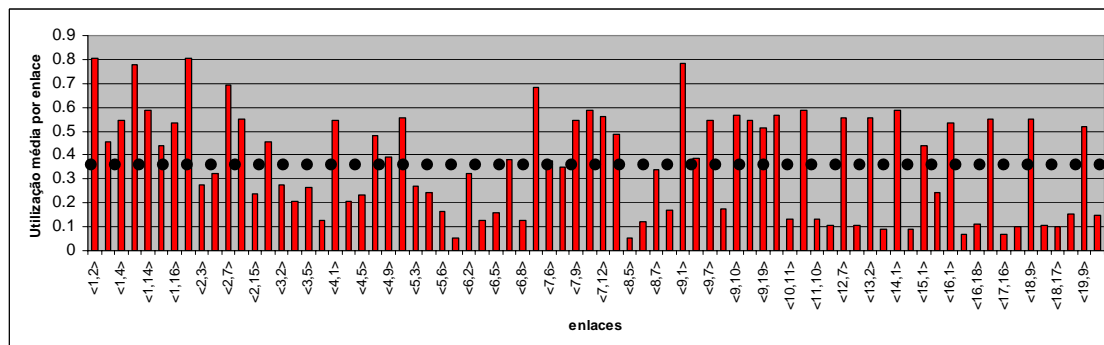


Figure 9 – Utilização média dos enlace na topologia da rede EON utilizando ADPS sob um carga de 550 Erlangs.

Com a análise das Figuras 8 e 9 é possível observar que a distribuição da carga de tráfego entre os enlaces da rede é não uniforme para as duas topologias estudadas. Para a topologia da rede Abilene sob a carga de 120 Erlangs, alguns enlaces tiveram utilização abaixo de 15% enquanto que outros apresentaram utilização de aproximadamente 45% dos recursos. Quando essa análise é feita para a topologia EON sob a carga de 550 Erlangs, o mesmo comportamento não uniforme é observado. Enquanto alguns enlaces apresentam uma utilização de aproximadamente 10% outros chegam a 80% de utilização. Essa análise evidencia uma deficiência dos algoritmos de roteamento utilizados nesse estudo e aponta também para a necessidade de um melhor balanceamento de carga entre os enlaces da rede.



## 6. Conclusão

Este artigo apresentou a ferramenta de simulação de redes ópticas transparentes TONetS (*Transparent Optical Network Simulator*). Ele foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o desempenho de redes ópticas transparentes que consideram a implementação conjunta de algoritmos RWA, técnicas de sobrevivência, estratégias de posicionamento de conversores de comprimento de onda além de políticas RWA para tentar minimizar injustiças no atendimento das conexões.

Foi apresentado também um estudo de caso utilizando a ferramenta TONetS comparando 3 técnicas de sobrevivência em redes ópticas aplicadas nas topologias de rede Abilene e EON. Esse estudo comparativo foi feito considerando métricas como probabilidade de bloqueio, nível de restauração, utilização da rede e probabilidade de bloqueio por ausência de recursos na rota de backup.

## Referências

- [1] Ramaswami, and Sivarajan, K. N. Optical Network - A Practical Perspective. Second edition. Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- [2] H. Zang, J. P. Jue and B. Mukherjee. A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Network. Optical Network Magazine, vol. 1, no. 1, pp. 47-60, Jan. 2000.
- [3] Chu, X., Liu, J., and Zhang, Z. Analysis of Sparse-Partial Wavelength Conversion in Wavelength-Routed WDM Networks. In IEEE INFOCOM 2004, pages 1363 - 1371.
- [4] A. Soares, J. Maranhão, W. Giozza e P. Cunha. First Load Priority: A Wavelength Converter Placement Scheme for Optical Networks with Sparse-Partial Wavelength Conversion. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC 2006, Brasil, Paraná - Curitiba.
- [5] Jing and B. Mukherjee, A Review of Fault Management in WDM Mesh Networks Basic Concepts and Research Challenges. IEEE Network, pages 41- 48, Apr. 2004.
- [6] Zang, H. and Mukherjee, B. Connection Management for Survivable wavelength-rerouted WDM Mesh. In Optical Network Magazine, p. 17-28, July, 2001.
- [7] Zhang, J., Zhu, K., Sahasrabuddhe, L., Ben, S. J., and Mukherjee, B. On the study of routing and wavelength assignment approaches for survivable wavelength routed wdm mesh networks. Optical Network Magazine, 4(6):16-28, 2003.
- [8] Canhui Ou, Jing Zhang, Hui Zang, L.H. Sahasrabuddhe, and B. Mukherjee. New and Improved Approaches for Shared-Path Protection in WDM Mesh Networks. Journal of Lightwave Technology, p. 1223 – 1232, May 2004.
- [9] Mohamed Mostafa A. Azim, et. Al. Comprehensive Performance Study of Active Restoration-Based Optical Networks under Dual- Failure Attacks. Fifth International Conference on Information, Communications and Signal Processing, p. 1202- 1206, Dec. 2005.

- [10] Yunhao Li; Francisco, M.J.; Lambadaris, I.; Changcheng Huang. “Traffic classification and service in wavelength routed all-optical networks”. IEEE International Conference on Communication – ICC, pp. 1375 – 1380, May 2003.
- [11] Barry, R.A.; Humblet, P.A. - “Models of blocking probability in all-optical networks with and without wavelength changers”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, , v. 14 n.. 5 , pp 858 –867, Jun. 1996.
- [12] Pramod, S.R.; Mouftah, H.T.; - “Traffic classification and fairness in wavelength routed optical networks”. International Conference on Parallel Processing Workshops. Proceedings, Page(s):422 – 426, 2004.
- [13] Mosharaf, K.; Talim, J.; Lambadaris, I.;- “Optimal Resource Allocation and Fairness Control in All-Optical WDM Networks”. IEEE Journal on Selected Areas in Comm. v. 23, n. 8, pp1496 – 1507, Aug. 2005.
- [14] A. Soares, J. Maranhão, e W. Giozza. SimRWA 2.0: Uma Ferramenta para Avaliação de Desempenho de Algoritmos RWA e de Técnicas de Sobrevivência em Redes Ópticas Transparentes. In IV Salão de Ferramentas do SBRC, p. 1231-1238, Maio 2005.
- [16] A. Soares, W. Giozza and P. Cunha. “A New Approach for Performance Evaluation of Survivability Services in All-Optical Networks”. In 14<sup>th</sup> IEEE International Conference on Telecommunications - ICT , Maio 2007.
- [17] A. Soares, J. Maranhão, W. Giozza and P. Cunha. Adaptive FLP - A New Wavelength Converter Placement Scheme for Optical Network with Sparse-Partial Wavelength Conversion. In 10th Conference on Optical Network Design and Modelling – ONDM, Copenhagen, Denmark, May 2006.
- [18] Anand, V. and Qiao, C. Effect of Wavelength Conversion in Survivable Wavelength. Technical report, Dept. of Computer Science and Engineering, State University of New York at Buffalo, 2002.
- [19] Ramamurthy, S. and Mukherjee, B. (1998). Fixed-alternate routing and wavelength conversion in wavelength-routed optical networks. In IEEE GLOBECOM'98, pages 2295 - 2302.