

Uma Estratégia Híbrida e Iterativa para Roteamento e Posicionamento de Nós OEO em Redes Ópticas Translúcidas

Gilvan Durães¹, Víctor Araújo², André Soares³, José Monteiro⁴, William Giozza⁵

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano (IF Baiano) –
Campus Catu –, BA – Brasil

²QUALCOMM Global Trading Pte. Ltd. – QGT PMIC Singapore – No. 6 Serangoon
North Ave 5, 554910 – Singapore

³Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação – Universidade Federal do
Piauí (UFPI) – Teresina, PI – Brasil

⁴Centro de Informática (CIn) – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) –
Recife, PE – Brasil

⁵Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade de Brasília (UnB) –
Brasília, DF – Brasil

gilvan.duraes@catu.ifbaiano.edu.br, giozza@unb.br

Resumo. Este trabalho propõe uma solução integrada para os problemas de dimensionamento e posicionamento de nós regeneradores OEO e roteamento multirrestritivo em redes ópticas translúcidas cientes das limitações da camada física óptica. A nova estratégia proposta, chamada *Iterative Approach for Routing and Regenerator Placement* (IARRP) é comparada com outros algoritmos de dimensionamento e posicionamento de nós OEO sob as métricas de utilização e dimensionamento de nós OEO. Além disso, por ser também, simultaneamente, uma estratégia de roteamento multirrestritivo, a IARRP é comparada com outras duas estratégias de roteamento multirrestritivo sob diferentes métricas de desempenho e topologias de rede. A estratégia proposta IARRP apresentou os melhores resultados em todos os cenários avaliados.

Abstract. *This work proposes a new integrated solution for the OEO regenerator nodes placement and multirrestrictive routing problems for physical layer impairment aware translucent optical networks. The new strategy named Iterative Approach for Routing and Regenerator Placement (IARRP) is compared in terms of OEO utilization and number of OEO nodes required in the networks with other OEO nodes placement algorithms proposed in the literature. Furthermore, the IARRP approach is compared with other multirrestricted routing algorithms. The evaluated scenarios include several representative topologies for translucent optical networking. For all studied scenarios, IARRP achieved superior performance.*

1. Introdução

A tecnologia de multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing* – WDM), a qual permite dividir a banda passante de uma fibra óptica em diversos canais ópticos de comunicação, é uma abordagem viável para

melhor utilizar a largura de banda da fibra óptica e atender ao rápido crescimento do tráfego da Internet [1][2].

Uma nova arquitetura de rede óptica WDM que utiliza conversor *Óptico-Eletró-Óptico* (OEO) em alguns nós intermediários da rede e comutador puramente óptico em outros nós, se torna cada vez mais uma realidade. Essa arquitetura de rede óptica 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][4]. Os nós que utilizam a conversão OEO para regenerar o sinal óptico são conhecidos por nós regeneradores OEO ou, simplesmente, nós OEO [3].

Para o estabelecimento de um circuito óptico (*lightpath*) entre um par de nós (origem, destino) de uma rede óptica, denotado neste trabalho por $par(o,d)$, é necessário definir uma rota e alocar um comprimento de onda em cada enlace dessa rota. O problema de roteamento e alocação de comprimento de onda, visando atender um maior número de solicitações dinâmicas de *lightpath* é conhecido como *Routing and Wavelength Assignment* (RWA) ou RWA dinâmico [2], [3], [6], [7].

Em [7] é apresentado um dos primeiros estudos de análise de desempenho dos algoritmos RWA em redes ópticas modeladas com degradações na camada física. Além de avaliar a disponibilidade de rotas e comprimentos de onda, os autores evidenciam a necessidade dos algoritmos de RWA considerarem as degradações de camada física para a escolha de recursos apropriados para o estabelecimento de circuitos ópticos.

Para incluir esta limitação não tratada nos algoritmos RWA pioneiros, foram concebidos os algoritmos da classe *Physical Layer Impairments constrained and aware RWA* (PLI-RWA) [7], [8], [9]. Os algoritmos PLI-RWA são algoritmos de roteamento e alocação de comprimento de onda cientes das restrições associadas à degradação da camada física óptica. O objetivo de um algoritmo PLI-RWA consiste em encontrar uma rota e um comprimento de onda para o estabelecimento de um circuito óptico, levando em consideração as degradações da camada física óptica (*e.g.*, atenuação da fibra, perdas de inserção, ruído da emissão espontânea de amplificador óptico, dispersão por modo de polarização e *crosstalk*) [8]. Desta forma, o problema de roteamento dinâmico ciente das degradações da camada física em redes ópticas translúcidas é considerado mais difícil que o problema correspondente para redes ópticas transparentes [2][7].

Com o objetivo de atender a uma lista de restrições ou requisitos impostos aos algoritmos PLI-RWA, são concebidos modelos e algoritmos de roteamento multirrestritivos [10][11]. Este trabalho utiliza a abordagem proposta em [11] para a modelagem de múltiplas restrições associadas às degradações da camada física óptica. Nesta abordagem, as restrições podem estar associadas ao comprimento de onda (*e.g.* *link crosstalk*), ao enlace óptico (*e.g.* distância) ou ao nó óptico (*e.g.* *switch crosstalk*). Neste caso, uma Rota Candidata Viável (RCV) é uma rota que atende a todas as restrições impostas ao roteamento.

Neste trabalho é adotado o tipo de rede óptica translúcida com posicionamento esparsos de nós regeneradores OEO. Neste tipo de rede óptica translúcida, os nós OEO devem ser estrategicamente posicionados na rede de modo a apresentarem o melhor rendimento em termos de regeneração do sinal óptico e ganho na probabilidade de bloqueio de requisições ópticas. Além disso, outro objetivo das estratégias de posicionamento de nós OEO é minimizar a quantidade necessária de nós regeneradores OEO na rede óptica translúcida, uma vez que, apesar de os nós OEO proporcionarem

uma melhor qualidade do sinal óptico, eles aumentam o custo de projeto da rede e inserem atrasos na comunicação óptica [5], [4].

Neste contexto, este trabalho propõe um algoritmo genético para roteamento fixo e, além disso, propõe uma nova estratégia híbrida que soluciona, simultaneamente, o problema de posicionamento esparsos de nós regeneradores e o problema de roteamento multirrestritivo em redes ópticas translúcidas. Os resultados de simulação mostram o melhor desempenho da estratégia proposta quando comparada com outros algoritmos de posicionamento esparsos de nós regeneradores e algoritmos de roteamento multirrestritivo.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção 2 são apresentados os trabalhos relacionados; na Seção 3 é apresentado o algoritmo genético GASTL que foi proposto e utilizado como módulo na proposta principal; na Seção 4 é apresentada a estratégia proposta *Iterative Approach for Routing and Regenerator Placement* (IARRP); na Seção 5 são discutidos os resultados de avaliação de desempenho da estratégia proposta IARRP comparando-a com outros algoritmos propostos na literatura; por fim, na Seção 6 são apresentadas as considerações finais.

2. Trabalhos Relacionados

O problema de dimensionamento e posicionamento de nós regeneradores OEO é uma especificidade do *Facility Location Problem* [16], sendo um problema de combinatória. Desta forma, a exploração de todas as combinações é computacionalmente inviável, tornando as propostas de heurísticas de dimensionamento e posicionamento plenamente justificadas [11], [13], [4], [14], [15], [17].

Uma heurística simples, por exemplo, seria realizar o roteamento de menor caminho e posicionar os regeneradores OEO nos nós que apresentarem maior número de *lightpaths* transitando, ou seja, nós que mais vezes são nós intermediários de *lightpaths*. Na literatura é possível encontrar diversas estratégias baseadas na predição da carga de tráfego da rede e/ou em simulações prévias e/ou programação linear, tais como *Transitional Weight* [11], *Genetic Approach* [15], *Iterative Regenerator Placement* [17], *Traffic Load Prediction* [18], *Signal Quality Prediction* [18], *Most Used Regenerator Placement e Simultaneous Used Regenerator Placement* [19]. A maioria destes trabalhos tem como foco o problema IA-RWA estático, onde os *lightpaths* são previamente conhecidos.

Considerando apenas a topologia da rede como entrada, sem a exigência de simulações prévias nem de predição da carga de tráfego e, além disso, considerando o cenário de tráfego dinâmico, as seguintes heurísticas de posicionamento de nós OEO foram propostas na literatura: *Centered Node First*, *Random Placement Algorithm*, *Nodal Degree First* [18], e *Hub Node First* [13]. Segundo os estudos realizados em [18], o algoritmo *Nodal Degree First* (NDF) apresentou melhores resultados quando comparado com as estratégias *Centered Node First* e *Random Placement Algorithm*, em todos cenários avaliados. Adicionalmente, o algoritmo *Hub Node First* (HNF) é proposto em [13] e citado em [5] e [4] como sendo um algoritmo avançado para posicionamento de nós regeneradores baseado em informações topológicas. Desta forma, os algoritmos NDF e HNF foram utilizados neste trabalho.

O algoritmo NDF, proposto em [18] prioriza os nós que apresentam maior grau físico (número de interfaces físicas) no posicionamento dos nós OEO. Os nós são

distribuídos até que todos os pares de nós (origem, destino) sejam alcançáveis. Já o algoritmo HNF [13] posiciona nós OEO priorizando os nós que possuem maior grau lógico. Um grafo lógico é criado com todos nós da topologia. Nesse grafo existe um enlace lógico entre cada par de nós, caso esses nós possam alcançar um ao outro. Desta forma, o grau lógico de um nó da rede óptica é o número de nós destinos que são alcançáveis por esse nó. O algoritmo finaliza quando todos nós da rede alcançarem todos os outros demais nós da rede [13]. Uma extensão do algoritmo HNF foi proposto em [14] para suportar cenários de sobrevivência a falhas.

Em [11] foram propostos os algoritmos *Offline Multi-Restrictive Routing* (Off-MRR) e *Multi Restrictive Routing* (MRR) para atender à nova modelagem de redes ópticas translúcidas com múltiplas restrições. Os algoritmos Off-MRR e MRR foram comparados em termos de probabilidade de bloqueio, utilização da rede e tempo de execução. O algoritmo Off-MRR é uma estratégia de roteamento fixo que leva em consideração todas as restrições do tipo *offline*, apenas. Já o MRR, além de pré-computar as rotas que atendem às restrições do tipo *offline*, retorna, durante a operação da rede, a primeira rota viável encontrada, considerando todas as restrições impostas à rede. Os algoritmos Off-MRR e MRR são utilizados neste trabalho.

3. Roteamento Fixo com Algoritmo Genético

Esta seção apresenta o algoritmo genético proposto *Genetic Algorithm for Shortest Translucent Lightpath* (GASTL) que é utilizado como módulo na estratégia principal proposta e apresentada na Seção 4.

O algoritmo genético é um método heurístico proposto por John Holland em 1975, inspirado na teoria evolutiva [20]. Os algoritmos genéticos possuem diversos conceitos presentes na teoria biológica como a mutação, cruzamento e seleção natural. No algoritmo genético uma população inicial é criada através do sorteio de suas características de forma aleatória. A cada geração é calculada a adaptabilidade através de uma função de avaliação para cada indivíduo da população. Dois pais se cruzam para formar dois filhos, os quais podem sofrer mutação. O processo de cálculo da adaptabilidade e reprodução é repetido até se alcançar a última geração.

A seguir são apresentadas as principais etapas do algoritmo genético.

Etapas do Algoritmo Genético

- 1) Gera população inicial aleatoriamente;
- 2) Calcula adaptabilidade;
- 3) Ordena os indivíduos de acordo à adaptabilidade de cada um deles;
- 4) Realiza o cruzamento e a mutação;
- 5) Verifica se alcançou a última geração. Se sim, finaliza o algoritmo. Se não, retorna para o Passo 2.

3.1. Modelagem do Cromossomo Base

No cromossomo base, cada gene representa uma rota viável de menor caminho para um determinado par de nós (origem, destino). Vale ressaltar que este mapeamento é realizado apenas para os pares de nós (origem, destino) que apresentam mais de uma Rota Candidata Viável (RCV). A Figura 1 exemplifica a modelagem do cromossomo base para uma topologia pequena com restrição de 2 saltos. Os pares de nós que apresentam apenas um menor caminho viável ($RCV - 1 = 0$) são descartados da

representação do cromossomo. Tal conduta não apenas reduz a utilização da memória como simplifica a modelagem do cromossomo do algoritmo genético.

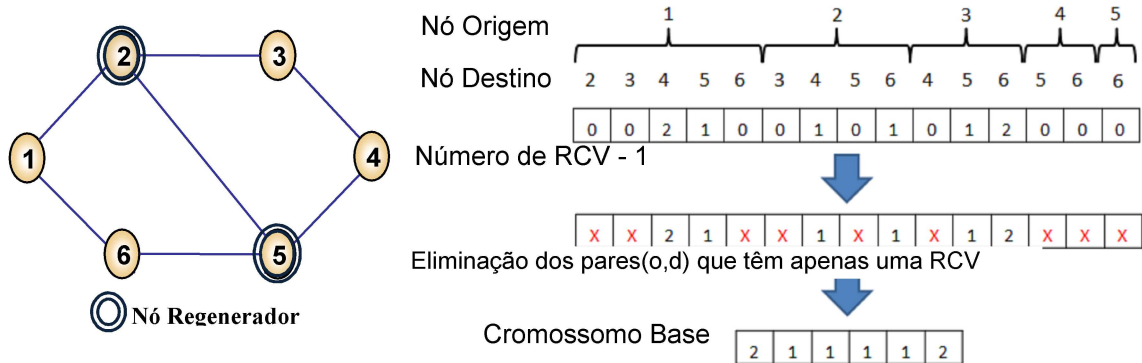


Figura 1. Formação do cromossomo base

A partir do cromossomo base é gerada a população inicial através do sorteio de números naturais entre zero e o valor de cada gene do cromossomo base. Após a geração dos primeiros indivíduos, a cada próxima geração os indivíduos têm a sua adaptabilidade avaliada por uma função objetivo. Neste algoritmo, os indivíduos mais aptos são os que resultam em uma configuração de rotas que possuem os enlaces menos carregados em termos de número de rotas por enlace.

3.2. Seleção

Os cromossomos pais são selecionados através do método da roleta [20]. Nesta fase é gerado um número aleatório entre zero e a soma da adaptabilidade de todos os indivíduos. Desta forma, os indivíduos são percorridos em ordem e sua adaptabilidade é somada, quando o valor da soma alcança ultrapassa o valor sorteado, o indivíduo é selecionado. No método da roleta, a probabilidade de o indivíduo ser sorteado é igual ao valor percentual da sua adaptabilidade na soma de todos os indivíduos. Assim, indivíduos com melhor adaptabilidade apresentam maior probabilidade de serem escolhidos pela roleta. A adaptabilidade de um indivíduo é dada pela função de avaliação do indivíduo.

A função de avaliação (também chamada de *fitness*) deve ser configurada para qualificar quão bom é um determinado cromossomo (representando, no caso, uma solução candidata de roteamento). Neste sentido, foram utilizadas funções baseadas na frequência de uso dos enlaces. Entende-se por frequência de uso do enlace o número de rotas que passam em um determinado enlace da rede. Duas funções de avaliação foram propostas e comparadas, são elas: Menor Pico (MP) e Menor Desvio Padrão (MDP). A primeira função (MP) é inversamente proporcional ao número de rotas que passam no enlace mais sobrecarregado da rede. A segunda (MDP) é inversamente proporcional ao desvio padrão da frequência de uso dos enlaces da rede.

3.3. Cruzamento e Mutação

A etapa de cruzamento (ou *crossover*) é realizada em n pontos do cromossomo, onde n corresponde a um valor gerado aleatoriamente que vai de zero ao número de genes menos um. Uma vez definidos os pontos de *crossover*, seus genes são trocados, formando dois cromossomos filhos recombinados. Com o objetivo de evitar um mínimo local é utilizada a técnica de mutação. A mutação ocorre após a operação de *crossover* e

possui baixa probabilidade de ocorrência. Na ocorrência de mutação, é alterado o valor de um gene aleatoriamente. A Figura 2 ilustra o procedimento de geração de filhos.

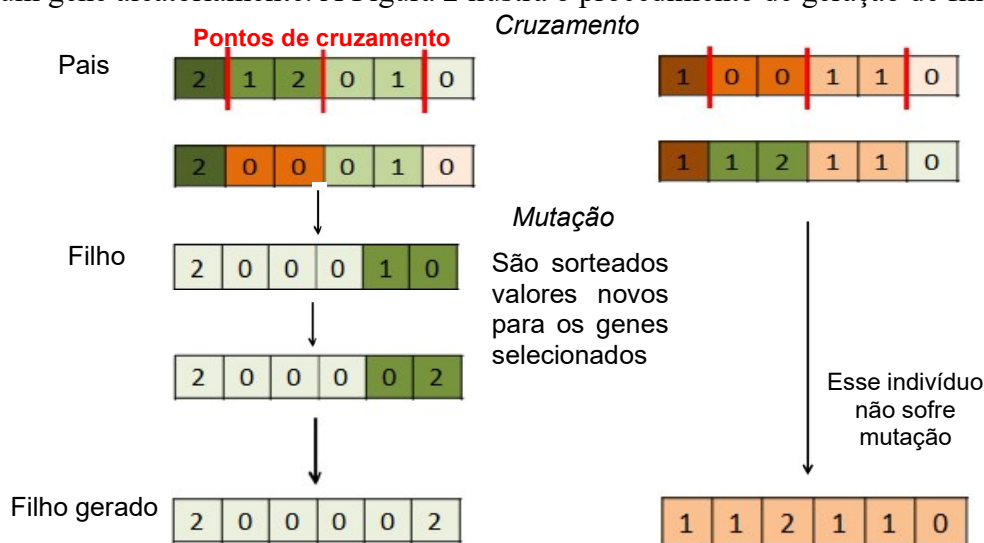


Figura 2. Cruzamento e mutação na geração de filhos.

Com o objetivo de evitar que o melhor indivíduo seja perdido, por não ser mantido no procedimento de seleção ou por sofrer uma mutação, o conceito de *elitismo* [20] é aplicado para obter sempre soluções melhores ou iguais às soluções obtidas nas gerações anteriores. A taxa de elitismo, dada como entrada para o algoritmo, representa o percentual de melhores indivíduos de uma geração que devem permanecer para a geração seguinte.

4. Estratégia híbrida e iterativa para o roteamento multirrestritivo e posicionamento de nós regeneradores OEO

Esta seção apresenta a estratégia proposta principal que tem como objetivos dimensionar e posicionar regeneradores OEO, assim como, simultaneamente, realizar o roteamento multirrestritivo em redes ópticas translúcidas.

Esta nova estratégia chamada de *Iterative Approach for Routing and Regenerator Placement* (IARRP) apresenta duas etapas. A primeira etapa define as possíveis soluções de posicionamento de nós regeneradores OEO. Esta etapa é inspirada no algoritmo HNF apresentado na Seção 2. Semelhantemente ao HNF, esta primeira etapa da estratégia IARRP se baseia no conceito de maior grau lógico para a escolha de um nó regenerador OEO. No entanto, ele utiliza a técnica de *backtracking* para escolher um “segundo caminho” durante a iteratividade do algoritmo. Na segunda etapa, a estratégia proposta IARRP utiliza como módulo o algoritmo genético GASTL (Seção 3) para auxiliar na escolha da melhor solução de posicionamento de nós OEO, bem como, para definição do roteamento. Nesta segunda etapa, a estratégia IARRP avalia as soluções parciais de posicionamento de nós regeneradores fornecidas na etapa anterior, por meio do módulo do algoritmo genético GASTL que realiza o roteamento fixo (*offline*) multirrestritivo ciente das degradações da camada física óptica. Desta forma, além do posicionamento de nós OEO, outra saída da estratégia proposta IARRP é a solução de rotas encontradas pelo algoritmo GASTL.

A seguir são apresentadas as principais etapas da estratégia proposta IARRP.

Etapas da estratégia IARRP:

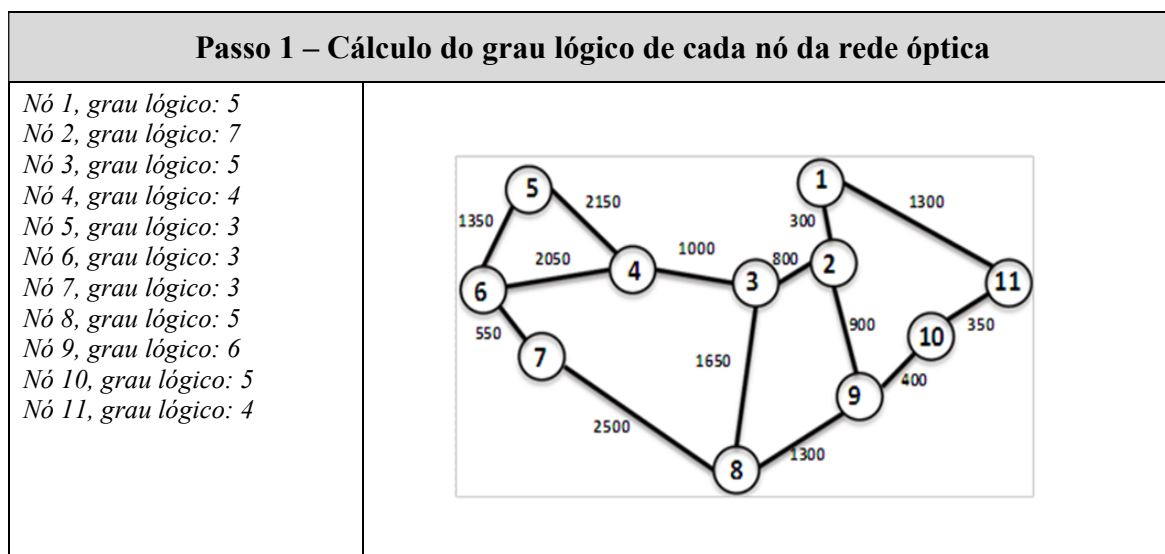
[Etapa 1] – Nesta etapa são determinadas as possíveis soluções de posicionamento de nós regeneradores.

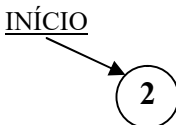
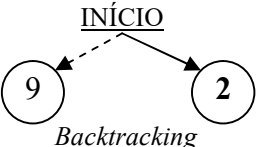
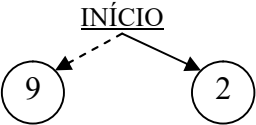
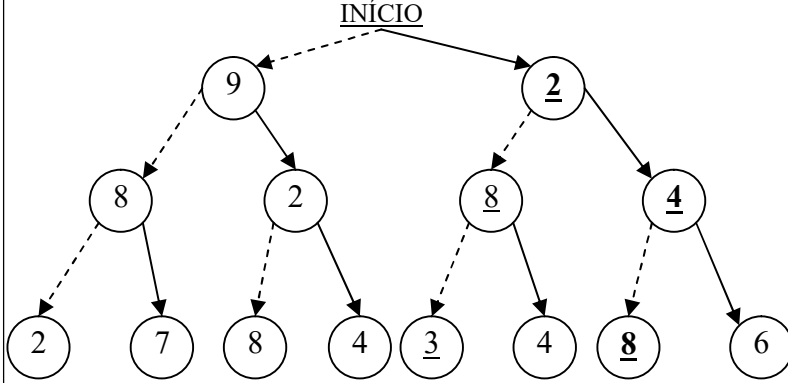
- 1) Calcular o grau lógico de cada nó da rede óptica, ou seja, o número de nós destinos que são alcançáveis por cada nó.
- 2) Posicionar regenerador OEO no nó que apresenta maior grau lógico. No caso de mais de um nó apresentar o maior grau lógico, utilizar o critério de maior grau físico (maior número de interfaces) como critério de desempate.
- 3) Utilizar a técnica de *backtracking* para escolher o segundo nó apto a ser nó OEO e continuar outra linha de execução do algoritmo para a segunda opção de nó OEO.
- 4) Verificar se todos os pares de nós (o,d) são alcançáveis. Caso negativo, retornar ao passo 1 para posicionar novo nó OEO. Caso positivo, seguir para a Etapa 2.

[Etapa 2] – Nesta etapa são conhecidas todas as possíveis soluções de posicionamento de nós OEO encontradas na etapa anterior.

- 5) Para cada solução de posicionamento de nós regeneradores P_i faça:
 - 5.a Utilizando o algoritmo de *Dijkstra* modificado [11], calcular o conjunto R de todas as possíveis rotas simples para cada $par(o,d)$.
 - 5.b Remover de cada conjunto R aquelas rotas que não satisfazem às restrições *offline* (ou por enlace, ou por comprimento de onda, ou por nó óptico).
 - 5.c Manter no conjunto R apenas as rotas de menor caminho em termos de número de saltos.
 - 5.d Executar o algoritmo GASTL, tendo como entrada as rotas candidatas do conjunto R .
 - 5.e Guardar a solução de rotas R_i encontrada pelo algoritmo GASTL. O valor da função de avaliação para P_i será o mesmo valor da função de avaliação para R_i .
- 6) Retornar as soluções P_i e R_i que obtiveram melhor avaliação.

A Figura 3 ilustra o passo-a-passo do algoritmo IARRP para a topologia da rede Abilene, considerando as restrições *offline* de 2 saltos e distância (2500Km).



Passo 2 – Posicionamento de nó OEO	
<p>Melhor nó: 2</p> <p>Grau lógico: 7</p>	<p>Sequência do posicionamento de nós:</p> 
Passo 3 – Uso da técnica de backtracking	
<p>Segundo Melhor nó: 9</p> <p>Grau lógico: 6</p> <p>Grau físico: 3</p>	<p>Sequência do posicionamento de nós:</p> 
Passo 4 – Verificação da alcançabilidade dos pares de nós	
<p><u>Linha de execução 1:</u> Nó posicionado: 2. Todos os pares de nós (o,d) são alcançáveis? Não.</p> <p><u>Linha de execução 2:</u> Nó posicionado: 9. Todos os pares de nós (o,d) são alcançáveis? Não.</p>	<p>Sequência do posicionamento de nós:</p> 
Execução dos Passos de 1 a 4 iterativamente...	
Última execução do Passo 4 – Verificação da alcançabilidade dos pares de nós	
<p><u>Linha de execução 1:</u> -Nós OEO posicionados: 2, 4, 6. - Todos os pares de nós (o,d) são alcançáveis? Sim.</p> <p><u>Linha de execução 2:</u> - Nós OEO posicionados: 9, 2, 4 - Todos os pares de nós (o,d) são alcançáveis? Não.</p> <p><u>Linha de execução 3:</u> - Nós OEO posicionados: 2, 8, 4. - Todos os pares de nós (o,d) são alcançáveis? Sim.</p> <p><u>Linha de execução 4:</u> -Nós OEO posicionados: 2, 4, 8. <i>solução repetida!</i></p> <p><u>Linha de execução 5:</u> - Nós OEO posicionados: 9, 8, 7. - Todos os pares de nós (o,d) são alcançáveis? Não.</p> <p><u>Linha de execução 6:</u> -Nós OEO posicionados: 9, 2, 8. - Todos os pares de nós (o,d) são alcançáveis? Não.</p>	<p>Sequência do posicionamento de nós:</p> 
<p><u>Linha de execução 7:</u> -Nós OEO posicionados: 2, 8, 3. - Todos os pares de nós (o,d) são alcançáveis? Não.</p>	<p><u>Linha de execução 8:</u> - Nós OEO posicionados: 9, 8, 2. - Todos os pares de nós (o,d) são alcançáveis? Não.</p>

Passos 5 e 6 – Avaliação das possíveis soluções com auxílio do algoritmo GASTL	
Solução 1 – Nós OEO posicionados: 2, 4, 6.	5. Para cada solução, - calcular as rotas viáveis de menor caminho (rotas candidatas); - executar o algoritmo GASTL, a partir das rotas candidatas; - retornar rota e solução de posicionamento que obtiveram melhor avaliação pela função de avaliação do GASTL. 6. O Pico da Frequência de Uso dos Enlaces das rotas encontradas pelo algoritmo GASTL para as soluções de posicionamento de nós OEO, Solução 1 e Solução 2, foi de 28 e 22, respectivamente. Portanto, a Solução 2 foi a escolhida.
Solução 2 – Nós OEO posicionados: 2, 4, 8.	

Figura 3. Exemplo de passo-a-passo da estratégia IARRP.

A próxima seção apresenta os resultados de estudos de simulação que comparam a estratégia proposta IARRP com algoritmos de posicionamento de nós regeneradores OEO e algoritmos de roteamento, em termos de dimensionamento de nós OEO, probabilidade de bloqueio e utilização da rede.

5. Avaliação de Desempenho

A ferramenta de simulação TONetS [21] foi estendida para suportar estudos de avaliação de desempenho de redes ópticas translúcidas cientes da degradação da camada física óptica. Esta seção apresenta resultados de avaliação de desempenho considerando os algoritmos de posicionamento de nós OEO – NDF [13], HNF [4] e IARRP (proposto neste trabalho) – e os algoritmos de roteamento multirrestritivos – Off-MRR [11], MRR [11] e IARRP (proposto neste trabalho).

Este estudo de avaliação de desempenho segue 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 λ e o tempo 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* [9] é utilizado na alocação dos comprimentos de onda. Para cada simulação são realizadas quatro replicações com diferentes sementes de geração de valores aleatórios. São geradas duas milhões de requisições para cada replicação. Os resultados gráficos apresentam os intervalos de confiança com um nível de confiança de 95%.

Neste estudo de avaliação de desempenho, a estratégia IARRP é comparada tanto com algoritmos de posicionamento de nós OEO, como algoritmos de roteamento, uma vez que a estratégia IARRP propõe o posicionamento de nós OEO e o roteamento, simultaneamente. As topologias avaliadas neste estudo foram as topologias das redes Abilene e Americana, representadas nas Figuras 4a e 4b, respectivamente. A estratégia IARRP é comparada com os algoritmos de posicionamento de nós regeneradores NDF e HNF (sob as métricas dimensionamento de nós regeneradores OEO, probabilidade de bloqueio e utilização da rede) e com os algoritmos de roteamento multirrestritivo Off-MRR e MRR (sob as métricas de probabilidade de bloqueio e utilização da rede).

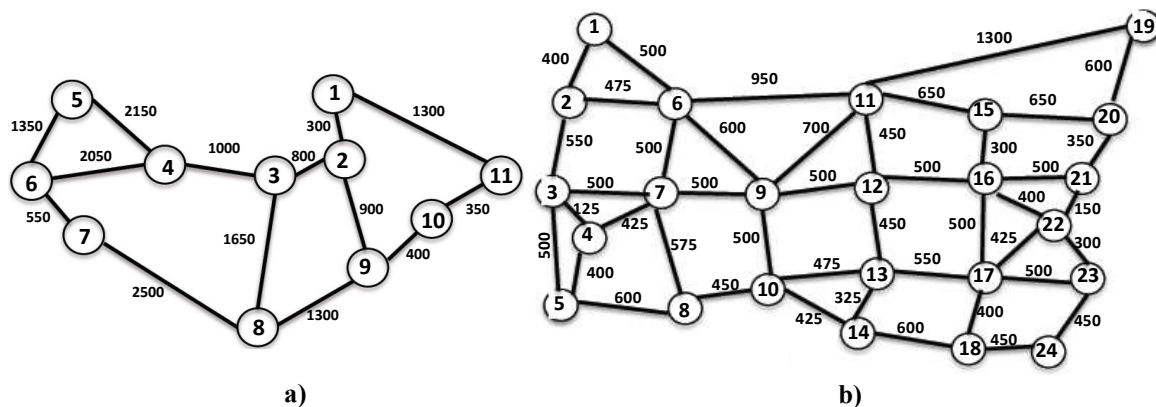


Figura 4. Topologias de rede avaliadas.

A Tabela I mostra os parâmetros para o algoritmo genético GASTL utilizado como módulo na estratégia IARRP nos experimentos deste trabalho.

Tabela I. Parâmetros utilizados para o algoritmo genético GASTL.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Probabilidade de cruzamento	0,9	Número de Gerações	10000
Número de pontos de cruzamento	2	Porcentagem de Elitismo	0,01
Probabilidade de Mutação	0,005	Função de Avaliação (<i>fitness</i>)	MP (para a topologia Abilene) e MDP (para a topologia Americana)
Tamanho da População	1000		

As restrições impostas foram as seguintes: distância (2.500 km para a topologia Abilene e 1.300 km para a topologia Americana), *Link Crosstalk* (2 unidades) [11] e saltos (2 saltos). O valor para a restrição de distância em cada topologia foi imposto de forma a tornar cada enlace da rede utilizável, ou seja, o limite de distância corresponde, no mínimo, à distância do maior enlace da rede.

A próxima subseção apresenta os resultados de dimensionamento de nós regeneradores OEO, comparando o posicionamento de nós OEO fornecido pelos algoritmos IARRP, NDF e HNF. Por fim, a última subseção discute os resultados de probabilidade de bloqueio e utilização da rede apresentados pelas estratégias de roteamento IARRP, Off-MRR e MRR.

5.1. Dimensionamento e Posicionamento de Nós Regeneradores OEO

A Tabela II apresenta, para cada topologia utilizada neste estudo, a quantidade de nós OEO posicionados por cada estratégia de posicionamento avaliada neste estudo.

Tabela II. Desempenho dos algoritmos de posicionamento de nós OEO.

Topologia de Rede	Estratégia de Posicionamento	Quantidade de Nós OEO Necessários	Nós OEO Posicionados
Abilene	NDF	3	2,4,8.
	HNF	3	2,4,6.
	IARRP	3	2,4,8.
Americana	NDF	8	6, 16, 3, 9, 13, 8, 11, 17.
	HNF	5	9, 16, 7, 11, 17.
	IARRP	4	11, 13, 7, 17.

Na Tabela II é possível observar que, para a topologia Abilene, os algoritmos de

posicionamento apresentaram o mesmo número de nós regeneradores OEO. No entanto, para a topologia Americana, o algoritmo NDF apresentou o pior desempenho em termos de quantidade de nós regeneradores OEO necessários. O algoritmo NDF escolhe os nós que apresentam maior grau físico, sem nenhum outro critério de escolha. Alguns desses nós com maior número de interfaces podem estar muito próximos topologicamente, necessitando de mais iterações do algoritmo para abranger toda a rede e, conseqüentemente, tornar todo par de nós (origem, destino) alcançável.

Por outro lado, é possível observar (Tabela II) que no cenário da topologia de rede Americana, a estratégia IARRP posicionou 4 (quatro) nós OEO, enquanto que as estratégias HNF e NDF posicionaram 5 (cinco) e 8 (oito) nós OEO, respectivamente. A estratégia proposta IARRP apresentou desempenho igual ou superior às demais estratégias avaliadas, em todos os cenários estudados (incluindo outras topologias de rede que, por limitação de espaço, não foram apresentados neste artigo). A superioridade do posicionamento realizado pela estratégia IARRP é justificada pelo fato dela utilizar a estratégia HNF como módulo de iteração, permitindo durante essa iteração a escolha de nós OEO diferentes da estratégia HNF, através da técnica de *backtracking*.

5.2. Probabilidade de Bloqueio e Utilização

Para a análise da probabilidade de bloqueio e utilização da rede, o algoritmo IARRP foi comparado com os outros dois algoritmos de roteamento multirrestritos Off-MRR e MRR. Vale resaltar que a estratégia híbrida IARRP proposta tem como objetivo o posicionamento de nós regeneradores OEO e roteamento ao mesmo tempo. Desta forma, foi utilizado o algoritmo HNF para o posicionamento de nós OEO nos cenários das estratégias de roteamento MRR e Off-MRR, denotados nos gráficos por HNF-MRR e HNF-OffMRR, respectivamente.

As Figuras 5 e 6 mostram os gráficos de Probabilidade de Bloqueio e Utilização da Rede para as topologias ilustradas na Figura 4a e 4b, respectivamente. Como evidenciam as Figuras 5a e 6a, o algoritmo IARRP apresentou os melhores resultados de probabilidade de bloqueio, em todos os cenários avaliados.

Conforme estudo realizado em [11] e comprovados pelos resultados apresentados neste trabalho, é esperado que o algoritmo Off-MRR não apresente menor probabilidade de bloqueio quando comparado ao algoritmo MRR, pois o algoritmo Off-MRR não considera em seu cálculo as restrições online como, por exemplo, a restrição imposta de *Link Crosstalk*. Além disso, o algoritmo Off-MRR retorna a primeira rota viável encontrada na fase de planejamento da rede.

Por outro lado, apesar de o algoritmo proposto IARRP considerar apenas as restrições estáticas (*offline*), ele realiza balanceamento de carga através do balanceamento da Frequência de Uso dos enlaces da rede, pois, dentre todas as menores rotas viáveis, escolhe de maneira criteriosa a rota fixa para atendimento das requisições dinâmicas de circuito óptico, fazendo uso do algoritmo genético GASTL apresentado na Seção 3. Já o algoritmo MRR, apesar de buscar atender tanto às restrições *offline* como às restrições online, retorna apenas a primeira rota viável encontrada dinamicamente.

Analisando os gráficos de utilização da rede (Figuras 5b a 6b), é possível concluir que o algoritmo IARRP apresenta melhor distribuição da utilização da rede, pois os gráficos mostram uso equivalente de recursos da rede por parte de todos os

algoritmos e menor probabilidade de bloqueio por parte do algoritmo IARRP.

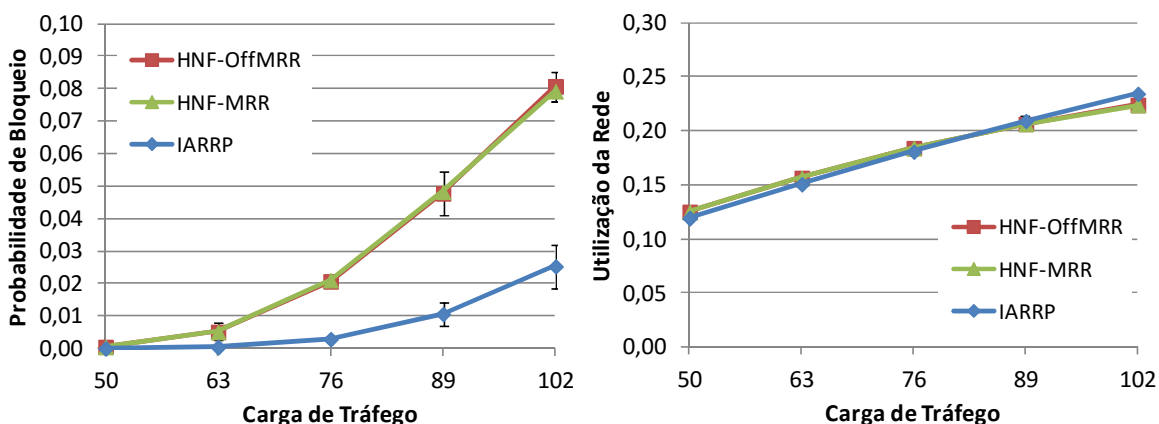


Figura 5. PB e Utilização – Topologia de Rede Abilene.

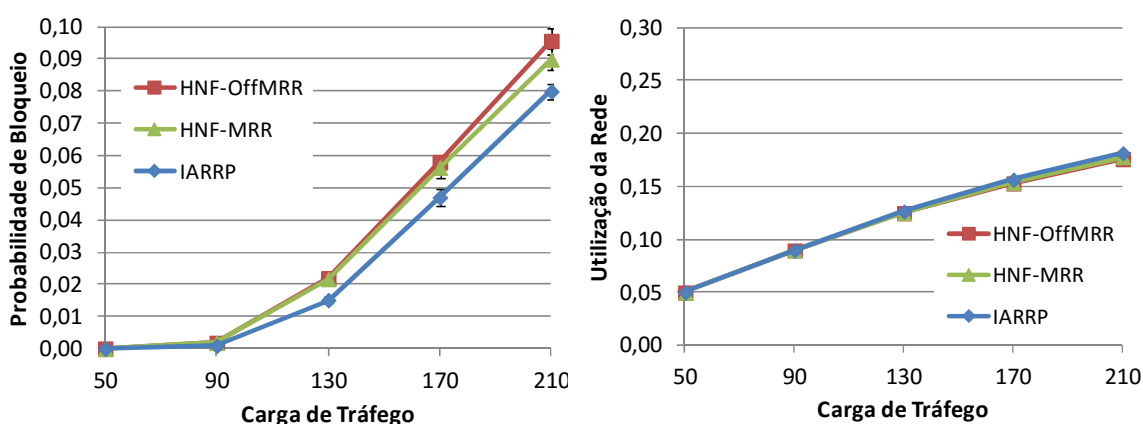


Figura 6. PB e Utilização – Topologia da Rede Americana.

A Tabela III mostra os valores de mínimo, máximo, média e desvio padrão da utilização dos enlaces das redes estudadas por parte dos algoritmos Off-MRR, MRR e IARRP para a carga máxima de tráfego exibida nos gráficos das Figuras 5 e 6. Ao lado do valor da utilização mínima e máxima está indicado o enlace que apresentou tal utilização, denotado por $\langle a,b \rangle$ (enlace do nó a para o nó b).

Tabela III. Valor mínimo, máximo, média e desvio padrão da utilização dos enlaces por parte dos algoritmos de roteamento multirrestritivos.

Topologia de Rede	Algoritmo	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Abilene	Off-MRR	0,2343	0,1685	0,0231 <i>Enlace <3,8></i>	0,5672 <i>Enlace <2,3></i>
	MRR	0,2237	0,1683	0,0228 <i>Enlace <7,8></i>	0,5660 <i>Enlace <2,3></i>
	IARRP	0,2343	0,1521	0,0459 <i>Enlace <6,7></i>	0,4799 <i>Enlace <2,3></i>
Americana	Off-MRR	0,1759	0,1597	0,0094 <i>Enlace <5,4></i>	0,6245 <i>Enlace <13,17></i>
	MRR	0,1777	0,1605	0,0094 <i>Enlace <5,4></i>	0,6271 <i>Enlace <13,17></i>
	IARRP	0,1813	0,1434	0,0187 <i>Enlace <3,4></i>	0,5708 <i>Enlace <11,12></i>

Na Tabela III, nota-se maior média de utilização dos enlaces, no entanto, menor desvio padrão, por parte do algoritmo IARRP (roteamento *offline*), inclusive quando comparado ao algoritmo alternativo-adaptativo MRR (roteamento adaptativo), ratificando a eficiência do balanceamento de carga realizado na fase de planejamento da rede por parte do algoritmo IARRP.

Vale ressaltar ainda que durante a fase de operação da rede a complexidade computacional do algoritmo IARRP é a mesma do algoritmo Off-MRR, pois ambos escolhem suas rotas na fase de planejamento da rede, sendo mínimo o tempo de execução do algoritmo na fase dinâmica da rede. Nestas simulações, o tempo médio de execução dos algoritmos IARRP e Off-MRR foi menor que 0,001 milissegundo, enquanto que o tempo médio de execução do algoritmo MRR foi de pouco mais de 2 milissegundos em todos os cenários avaliados.

6. Considerações Finais

Este trabalho propôs uma nova estratégia (IARRP) para solucionar, simultaneamente, tanto o problema de posicionamento de nós regeneradores OEO como também o problema de roteamento multirrestritivo em redes ópticas translúcidas. A nova estratégia proposta, IARRP, foi avaliada comparativamente com outros algoritmos propostos na literatura, em diversas topologias de rede. Por limitação de espaço, foram apresentados resultados para duas topologias (Abilene e Americana). Nestas topologias de rede, bem como nas outras topologias de rede avaliadas, o IARRP apresentou os melhores resultados sob as métricas de dimensionamento de nós OEO, probabilidade de bloqueio e utilização dos recursos da rede.

Além disso, destaca-se que, enquanto a estratégia MRR é uma estratégia alternativa adaptativa (dinâmica), a estratégia proposta IARRP é uma estratégia de roteamento *offline* (fixo), ou seja, apresenta o mínimo de complexidade possível durante a operação da rede e, ainda assim, supera as expectativas, apresentando melhor desempenho, em todos cenários avaliados. Tal comportamento é justificado pela eficiência no balanceamento de carga por parte da estratégia proposta IARRP.

Referências

- [1] T. Morioka, “New generation optical infrastructure technologies: ‘EXAT initiative’ towards 2020 and beyond” in *Proc. 14th OECC*, Jul. 2009, p. 1–2.
- [2] F. Ye, *et al.*, “Wavelength-Dependence of Inter-Core Crosstalk in Homogeneous Multi-Core Fibers”, in *Photonics Technology Letters, IEEE*, v. 28, n.1, p.27-30, Janeiro, 2016.
- [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] I. Nath, M. Chatterjee e U. Bhattacharya, “A survey on regenerator Placement Problem in translucent optical network”, in *International Conference on Circuits, Systems, Communication and Information Technology Applications (CSCITA)*, p.408-413, 4-5, April, 2014.
- [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] 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.
- [7] B. Ramamurthy, *et al.*, “Impact of Transmission Impairments on the Teletraffic Performance of Wavelength-routed Optical Networks”, *Journal of Lightwave Technology (JLT)*, v. 17, n. 10, p. 1713- 1723, 1999.
- [8] 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.
- [9] S. Varanasi, S. Bandyopadhyay e A. Jaekel, “Impairment aware dynamic routing and wavelength assignment in translucent optical WDM networks,” in *Distributed Computing and Networking, ser. Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin Heidelberg, v. 8314, p. 363–377, 2014.
- [10] A. G. Rahbar, “Review of dynamic impairment-aware routing and wavelength assignment techniques in all-optical wavelength-routed networks”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v.14, n.4, p. 1065-1089, 2012.
- [11] G. M. Durães, J. A. S. Monteiro e W. F. Giozza, “A new approach for multi-restrictive routing in translucent optical networks” in *2014 Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems (SBRC)*, Florianópolis, Brazil, p. 428-435, 5-9, Maio 2014.
- [12] G. Shen, *et al.*, “Sparse placement of electronic switching nodes for low blocking in translucent optical networks”. *Journal of Optical Networking*, v. 1, n. 12, p. 424-441, Dezembro, 2002.
- [13] G. Shen e W. D. Grover, “Segment-based approaches to survivable translucent network design under various ultra-long-haul system reach capabilities”. *Journal of Optical Networking*, v. 3, n. 1, p. 1-24, Janeiro, 2004.
- [14] A. Sen e S. Murthy e S. Bandyopadhyay, “On Sparse Placement of Regenerator Nodes in Translucent Optical Networks”, *IEEE GLOBECOM 2008*, p. 1-6, Dezembro, 2008.
- [15] F. Martinelli, *et al.*, “Genetic approach for optimizing the placement of all-optical regenerators in WSON”, in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 6, n. 11, p.1028-1037, Novembro, 2014.
- [16] E. Gourdin, *et al.*, *Facility Location: Applications and Theory*, Springer, 2001.
- [17] B. Garcia-Manrubia, “Offline Impairment-Aware RWA and Regenerator Placement in Translucent Optical Networks”, in *Journal of Lightwave Technology*, v.29, n.3, p.265-277, Fevereiro, 2011.
- [18] X. Yang e B. Ramamurthy, “Sparse Regeneration in Translucent Wavelength-Routed Optical Networks: Architecture, Network Design and Wavelength Routing”, *Photonic Network Communications*, v.1, n, 10, p. 39–53, Março, 2005.
- [19] D. A. R. Chaves, *et al.*, “Novel strategies for sparse regenerator placement in translucent optical networks”. *Photonic Network Communications*, v.1, n. 24, p. 237–251, Maio, 2012.
- [20] J. H. Holland, “Adaptation in Natural and Artificial Systems”, *University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan*, 1975/1992.
- [21] 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.