

## Planejamento Otimizado de Redes de Transporte Ópticas Utilizando Técnica de Inteligência Artificial

Bruno Q. de Oliveira<sup>1,2</sup>, Victor H. Cunha<sup>2</sup>, Herberth V. S. P. Júnior<sup>2</sup>, Lucas .C  
Guimarães<sup>2</sup>, Marcos A. de Sousa<sup>1,2</sup>, Flávio H. T. Vieira<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação – Universidade Federal de  
Goiás – Goiânia – GO – Brasil

<sup>2</sup> Escola de Engenharia – Pontifícia Universidade Católica de Goiás – Goiânia – GO –  
Brasil

{brquirino,victor.puc.engel,hvinciciusjunior,lucascg1995,  
masousa.damasio,flaviohtv}@gmail.com

**Abstract.** *The growth in data traffic is raising serious challenges for optical transport networks in terms of improving their capacity efficiency in order to meet the new traffic requirements. Under these circumstances, the task of efficiently utilizing available resources opens opportunities for the development of a variety of techniques for network planning. This paper presents a decision support system for the sizing of optical transport networks. It is considered the optical network planning problem in which a traffic interest matrix between the demand nodes is specified. The network is modeled as a graph, through the arc-path approach. A model using genetic algorithm is developed for cost minimization. Restrictions on demand guarantee, technical capacity of equipment and exclusivity in the link modularity are also addressed. Results of the simulation of the optimization model for a medium-sized network are presented and discussed.*

**Resumo.** *O crescimento do tráfego de dados está levantando sérios desafios para as redes de transporte ópticas em termos de melhoria de eficiência de capacidade, a fim de atender aos novos requisitos de tráfego. Nessas circunstâncias, a tarefa de utilizar com eficiência os recursos disponíveis abre oportunidades para o desenvolvimento de uma variedade de técnicas para o planejamento da rede. Este artigo apresenta um sistema de suporte à decisão para o dimensionamento de redes de transporte ópticas. É considerado o problema de planejamento de rede óptica no qual uma matriz de interesse de tráfego entre os nós de demanda é especificada. A rede é modelada como um grafo, através da abordagem arco-caminho. Um modelo utilizando o algoritmo genético é desenvolvido para minimizar o custo. Restrições de garantia de atendimento de demanda, de especificidades de capacidade técnica de equipamentos e de exclusividade na alocação de modularidade de enlace de transmissão também são contempladas. Os resultados da simulação do modelo de otimização para uma rede de tamanho médio são apresentados e discutidos.*

## 1. Introdução

O surgimento de novas tecnologias e serviços vem impondo mudanças substanciais aos sistemas de telecomunicações. Estas transformações estão acontecendo em grande escala para atender o desenvolvimento da Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*), da computação em nuvem e dos sistemas de comunicações móveis de 4<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> geração. O impacto imediato da implantação e utilização destas tecnologias surge com a necessidade de se ter uma rede de telecomunicações com alta capacidade na transmissão de dados [Kamur 2017], [Mumtaz 2017] e [Li 2018].

No segmento de rede responsável pelo acesso do usuário, a rede ainda continua bastante capilarizada, devido à variedade de serviços oferecidos. A inovação surge com a diversidade de tecnologias que são desenvolvidas para oferecer estes serviços, sejam elas para o segmento fixo cabeado, sejam para o segmento móvel celular.

Por outro lado, no núcleo da rede, o *backbone*, o compartilhamento de recursos é uma atividade fundamental. O desenvolvimento de novas tecnologias de comutação, gerenciamento e transmissão procuram explorar a enorme capacidade de operação da fibra óptica.

No cenário nacional, redes de transporte utilizando as tecnologias Hierarquia Digital Plesiócrona (PDH - *Plesiochronous Digital Hierarchy*) e Hierarquia Digital Síncrona (SDH - *Synchronous Digital Hierarchy*) [Jeszensky 2004] continuam sendo uma realidade, principalmente nos segmentos periféricos da rede. A evolução tecnológica das redes PDH e SDH tem sido praticada pelas operadoras de redes de fibra óptica paulatinamente, conforme exigências no aumento da capacidade de transmissão, acrescidas da eficiência nos processos de gerenciamento e operação para atender com qualidade os novos serviços.

Em termos mercadológicos, a rede de transporte óptica (OTN - *Optical Transport Network*) vem sendo apontada como a responsável pela evolução das redes PDH e SDH [Wang 2012]. A rede OTN, acrescida da versatilidade da Multiplexação Densa por Divisão de Comprimento de onda (DWDM - *Dense Wavelength Division Multiplexing*), minimiza a dificuldade de transporte de dados com a Multiplexação por Divisão de Tempo (TDM - *Time Division Multiplexing*) presente nas redes PDH e SDH. Segundo a recomendação G.709 da ITU-T [ITU-T 2012], a OTN é vista como um protocolo da nova geração que fornece um transporte eficiente por canalização óptica baseado em comprimentos de onda, oferecendo melhor integridade e gerência para a rede. A OTN possibilita uma infraestrutura de rede flexível e de alta capacidade de transmissão. A OTN fornece, também, uma gerência que permite isolamento de falhas com técnicas avançadas para a resolução de eventuais problemas de operação.

Nestas circunstâncias, a rede óptica encontra-se sujeita a inovações tecnológicas constantemente, de forma a aproveitar melhor a infraestrutura atual para as altas taxas de transmissão. Por outro lado, à medida que a rede se torna mais complexa, a utilização eficiente dos seus recursos torna-se um problema de grande preocupação. A busca por algoritmos para otimizar a capacidade dos recursos é uma orientação promissora no sentido de melhorar os Sistemas de Apoio a Decisão (SAD) criados para auxiliar no planejamento da rede.

Neste cenário, é natural que diferentes problemas de otimização venham sendo propostos na literatura para o dimensionamento de redes de transporte ópticas. As metodologias empregadas em cada caso são extremamente influenciadas pela abrangência da rede, pela tecnologia de transmissão a ser utilizada e pelas fontes de informações disponíveis. Entretanto, uma característica comum entre estes problemas de otimização é que eles, impreterivelmente, possuem uma matriz de interesse de tráfego que necessita ser roteada desde os nós de origem até os nós destino.

Este artigo tem por objetivo o desenvolvimento de um SAD para ser utilizado no planejamento estratégico de redes de transporte ópticas. O dimensionamento da rede é feito utilizando um modelo de Programação Linear Inteira Mista (MILP - *Mixed-Integer Linear Programming*) [Bazaraa 2010], que é resolvido utilizando algoritmo genético. O modelo seleciona caminhos ótimos de um conjunto de caminhos pré-candidatos disponíveis para o escoamento da matriz de tráfego prevista. O dimensionamento dos recursos é realizado objetivando um custo mínimo, composto pela possibilidade de alocação de equipamentos de transmissão nos nós e de enlace óptico e regeneradores nos *links* da rede.

## 2. O Problema

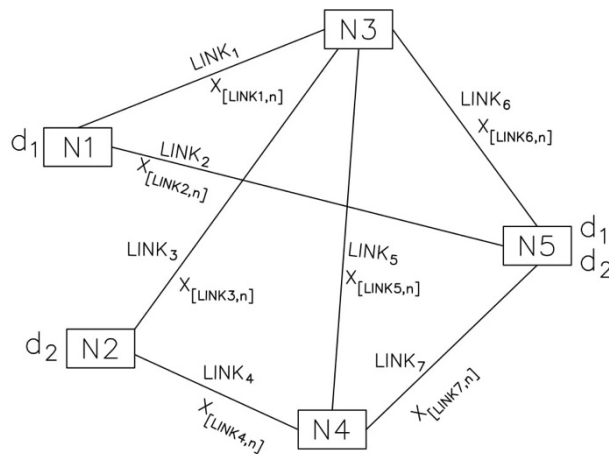
O problema de planejamento de redes de transporte ópticas é complexo e de difícil solução [Simmons 2014]. As demandas da matriz de interesse de tráfego devem ser escoadas entre os nós por meio de *links* com uma capacidade associada. Neste contexto, a ênfase do planejamento está na determinação da estratégia ótima para acomodar o conjunto de demandas.

Neste trabalho, o modelo de fluxo em rede (grafos) [Bazaraa 2010] é utilizado para representar o problema de planejamento da rede de transporte óptica. A Figura 1 mostra um exemplo de grafo,  $G = (V, LINK, DEM)$ , onde  $V$  indica o número de nós,  $LINK$  o número de arcos e  $DEM$  as demandas a serem escoadas pela rede. Neste trabalho é considerada a abordagem arco-caminho.

Os principais elementos desta representação são:

Nós de Demanda: os nós de demanda são pontos concentradores e geradores de demanda para o atendimento dos usuários do sistema. Estes nós, devem estar fisicamente associados a um sistema de transmissão. Cada nó é identificado por um número  $[i]$ . A rede exemplo da Figura 1 possui cinco nós de demanda e sete *links*.

Demanda Prevista: um dos objetivos do dimensionamento da rede é atender a demanda prevista entre os nós da rede. Cada demanda é caracterizada por seus dois nós finais e o volume de tráfego que deve ser roteado através da rede. Este volume de tráfego pode ser expresso em múltiplos de alguma unidade de roteamento base ou até mesmo em termos de taxa de transmissão exigida. Entre os nós finais, um nó representa o nó de origem da demanda e o outro o nó de destino. Na rede exemplo da Figura 1 estão indicados dois valores de demanda previstos:  $d_1$  (entre o nó 1 e o nó 5) e  $d_2$  (entre o nó 5 e o nó 2).



**Figura 1. Representação da rede de transporte - arco-caminho.**

Links (arcos) Candidatos: cada *link* da rede representa a ligação entre dois nós de demanda. O fluxo de demanda escoado pelos *links* é utilizado para garantir o atendimento das necessidades de demanda entre os nós da rede. Os *links* de escoamento de demanda que ligam todos os nós de demanda entre si são identificados por um nome e um índice, tal como *LINK2*, que identifica o *link* que liga os nós de demanda 2 e 5. A capacidade total de cada *link*, representada pela capacidade dos equipamentos de transmissão alocados, deve ser capaz de atender o fluxo de demanda escolhido para ser escoado por aquele *link*. A escolha da capacidade de cada *link* está representada por uma variável de decisão do tipo inteira binária como, por exemplo,  $X[LINK2, n]$ , que representa a escolha (ou não) de um sistema de transmissão de modularidade  $[n]$  para ser alocado no *LINK2*.

Caminhos Candidatos: um caminho é definido por uma sequência de nós adjacentes sem repetição por onde um fluxo de demanda pode passar, sendo que cada fluxo de demanda utiliza um ou mais caminhos distintos. Para cada demanda prevista entre dois nós da rede, é especificado um conjunto de caminhos que podem ser utilizados para escoar a demanda desde o seu nó de origem até o seu nó de destino. Para a rede exemplo da Figura 1, onde estão especificadas duas demandas, os possíveis conjuntos de caminhos para atender as demandas  $d_1$  e  $d_2$  estão indicados na Tabela 1. Esta escolha é feita através de variáveis de decisão do tipo real,  $Y[caminho, demanda]$ , que especificam a parcela da demanda (por exemplo  $d_1$ ), que será escoada pelo caminho (por exemplo  $P_1$ ).

**Tabela 1. Exemplo de Caminhos para Escoamento das Demandas.**

<b>Demanda</b>	<b>Caminhos</b>	<b>LINKs</b>
$d_1$	$P_1$	<i>LINK2</i>
	$P_2$	<i>LINK1</i> → <i>LINK6</i>
$d_2$	$P_3$	<i>LINK7</i> → <i>LINK4</i>
	$P_4$	<i>LINK6</i> → <i>LINK3</i>
	$P_5$	<i>LINK6</i> → <i>LINK5</i> → <i>LINK4</i>

### 3. Trabalhos Correlatos

O problema de planejamento de redes de transporte ópticas tem sido bastante estudado na literatura. O objetivo principal do planejamento quase sempre é o mesmo: alocar e dimensionar os recursos disponíveis da forma mais eficiente possível em termos de orçamento, com os modelos de otimização orientados a minimização de custos. Basicamente, as metodologias se divergem devido a: quais tecnologias adotadas, quais recursos são considerados como mais relevantes para o objetivo que se deseja alcançar e a abrangência da rede a ser dimensionada.

O trabalho de [Orlowski 2010] descreve a biblioteca pública SNDlib (*Survivable Network Design library*). O objetivo é fornecer dados realistas de planejamento de rede que podem ser usados para comparar diferentes modelos matemáticos e algoritmos de otimização. A SNDlib contém 22 topologias de rede e aproximadamente 800 instâncias de teste que podem ser utilizadas para o planejamento de redes ópticas, nas tecnologias PDH, SDH, WDM, entre outras [Orlowski 2010].

Para redes SDH, mecanismos de roteamento de demanda com múltiplos caminhos são propostos em Srivastava et al. (2006) e Ahuja et al. (2004). Nestes trabalhos, a Programação Linear Inteira (ILP – *Integer Linear Programming*) é utilizada para selecionar os caminhos ótimos a partir de um conjunto de caminhos pré-computados para cada demanda.

Ainda utilizando a abordagem arco-caminho, o trabalho de Assis et al. (2013) fornece uma ferramenta para analisar o comprometimento entre o número de transceptores alocados e a forma de utilização da rede. Com o objetivo de se fazer uso eficiente dos recursos disponíveis, a metodologia desenvolvida está baseada em um MILP que é utilizado para avaliar o dimensionamento de redes OTN.

Com o crescimento explosivo das demandas, oriundas de várias fontes de serviços, a atuação da rede de transporte frente a possíveis falhas tornou-se em campo de estudo de grande relevância. Em Santos et al. (2017) é proposto um algoritmo heurístico para resolver o problema de roteamento no contexto das redes OTN/DWDM. A aplicação envolve vários cenários de rede em relação à topologia, distribuição de tráfego e formatos de transmissão disponíveis, a fim de quantificar os benefícios de eficiência de implantação de formatos de *grid* flexível.

Já o trabalho de Eira et al. (2014) apresenta uma modelagem multiobjetivo para otimizar a implantação de rede OTN/WDM com diversidade de canal e com diferentes níveis de resiliência a falhas de *links* e *transponders*. O algoritmo proposto permite considerar todos esses diferentes aspectos simultaneamente, com destaque para o grau em que o custo da rede pode ser negociado para diferentes níveis de proteção

### 4. Modelo Matemático

Nesta seção é apresentada a formulação matemática para o problema de planejamento da rede óptica. A rede é vista como um conjunto de nós e arcos. O modelo de otimização está baseado na Programação Linear Inteira Mista (MILP) e utiliza a abordagem arco-caminho [Bazaraa 2010].

O modelo MILP faz uso da seguinte notação:

LINK: conjunto formado por todos os arcos da rede, utilizados para interligar os nós de demanda;

$O_{LINK}$ : conjunto de modularidades (capacidades),  $[n]$ , dos sistemas de transmissão óptica candidatos nos *links*  $[i] \in LINK$ ;

DEM: conjunto formado por todas as demandas previstas para serem atendidas pela rede;

$P_k$  : conjunto de caminhos candidatos a atender a demanda  $[k] \in DEM$ ;

$\Omega_i$  : conjunto formado por todos os caminhos que necessitam utilizar o *link*  $[i]$  para escoar o seu fluxo de demanda;

$Y_{kj}$  : variável real que representa a parcela da demanda  $[k] \in DEM$ , atendida pelo caminho  $[j] \in P_k$ ;

$c_{in}$ : custo agregado do sistema de transmissão óptica de capacidade  $[n] \in O_{LINK}$ , candidato no *link*  $[i] \in LINK$ . Dependendo da tecnologia utilizada e do comprimento do *link*, este parâmetro pode ser constituído por custos: de rede, de multiplexadores, de *transponders*, de regeneradores; entre outros;

$d_k$ : demanda  $[k] \in DEM$  prevista para ser atendida entre um nó de origem e um nó de destino de demanda da rede. Esta demanda pode ser especificada em termos de taxa de transmissão ou em quantidade de um serviço modular padrão;

$Cap_n$ : capacidades (modularidades),  $[n]$ , dos sistemas de transmissão óptica candidatos. Naturalmente, a especificação deste parâmetro depende da tecnologia adotada.

Adicionalmente, são utilizadas as seguintes variáveis de decisão no MILP:

$Y_{kj}$ : variável real que contabiliza o fluxo de demanda escoado pelo caminho  $[j]$  para atender a demanda  $[k]$ ;

$X_{in}$ : variável binária (0 ou 1) que indica se o *link*  $[i]$  de capacidade  $[n]$  é ou não escolhido para ser alocado.

O MILP pode então ser formalmente indicado como:

$$\text{Min} \sum_{[i] \in LINK} \sum_{[n] \in O_{LINK}} c_{in} X_{in} \quad (1)$$

$$\sum_{[j] \in P_k} Y_{jk} = d_k \quad \forall k \in DEM \quad (2)$$

$$\sum_{[n] \in O_{LINK}} Cap_n X_{in} - \sum_{[j] \in \Omega_i} Y_{kj} \geq 0, \quad \forall [i] \in LINK \quad (3)$$

$$\sum_{[n] \in O_{LINK}} X_{in} \leq 1, \quad \forall [i] \in LINK \quad (4)$$

A função objetivo (1) se refere ao custo mínimo gerado pela implantação da rede. É calculada somando-se os custos dos sistemas de transmissão óptica escolhidos para o escoamento da demanda entre os nós da rede. O produto  $c_{in}X_{in}$  contabiliza este custo quando a variável  $X_{in}$  assume valor 1 (um).

As restrições de balanço de demanda (2) estão previstas para cada demanda prevista para ser atendida na rede. Elas garantem que o somatório dos fluxos de demanda dos caminhos candidatos para atender uma determinada demanda seja igual ao valor previsto para esta demanda.

As restrições de capacidade técnica (3) ocorrem em cada *link* previsto pelo planejador para o escoamento das demandas. Elas asseguram que a capacidade do sistema de transmissão alocado num *link* seja suficiente para escoar todo o fluxo de demanda que utiliza aquele *link*. Este conjunto de restrições podem necessitar de ajustes para modelar algumas especificidades da tecnologia utilizada no sistema de transmissão óptica.

O conjunto de restrições de exclusividade (4) assegura que apenas um sistema de transmissão óptica deve ser alocado em cada *link*. O objetivo é privilegiar o ganho de escala comumente praticado no mercado, evitando buscas desnecessárias por soluções que utilizem *links* paralelos. Naturalmente, a utilização deste conjunto de restrições pode se dar de forma facultativa, conforme os interesses do planejador.

A escalabilidade do modelo é comprometida pela sua complexidade, de acordo com o número de variáveis (principalmente as binárias) e restrições requeridas. Admitindo um cenário de pior caso, onde todas as demandas podem ser atendidas, cada uma por  $k$  caminhos factíveis, através de links que apresentam todas as modularidades candidatas, o número de variáveis requeridas é  $(|LINK| \times |O_{LINK}| + |DEMI| \times k)$ . Já a quantidade de restrições é dada por  $(|DEMI| + 2 \times |LINK|)$ .

## 5. Implementação Computacional do Modelo

No problema considerado neste trabalho, a solução precisa incluir as rotas escolhidas para escoar cada demanda, bem como os sistemas de transmissão alocados em cada *link*. Em ordem, a solução candidata é codificada em um genoma, compreendido por cromossomos [Linden 2012]. Cada cromossomo representa a demanda a ser atendida, bem como a codificação dos caminhos possíveis de serem utilizados para escoar a demanda. O custo da rede não está diretamente codificado, já que sua avaliação é realizada pela função de aptidão (*fitness*), modelada em (1).

A Figura 2 mostra a representação cromossômica utilizada neste trabalho, onde cada demanda pode escolher um caminho de escoamento de um conjunto de caminhos pré-calculados. Vale observar que as variáveis binárias,  $X$ , modelam a possibilidade de alocar (ou não) um sistema de transmissão de modularidade  $[n]$  ( $n=3$  na Figura 2) e as variáveis  $Y$  representam o fluxo de demanda escoado pelo caminho  $P_k$  ( $k=5$ , na Figura 2). Os operadores evolutivos são detalhados a seguir.

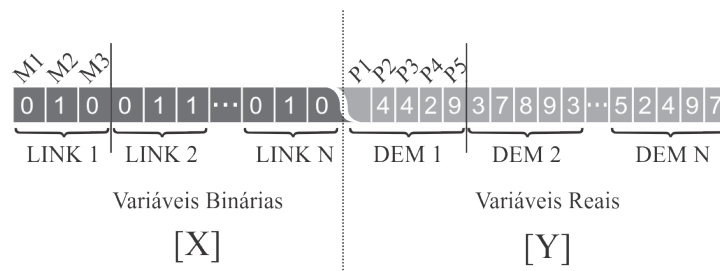


Figura 2. Codificação do cromossomo e estrutura do genoma.

População inicial: a quantidade de indivíduos que farão parte da população inicial é definida pelo planejador. O tamanho dessa população é mantido durante todo o processo iterativo, sendo que cada indivíduo da população é criado em duas etapas:

- *Etapa das variáveis Y*: Consiste em alocar aleatoriamente os valores de demandas a serem escoados em algum dos caminhos disponíveis. Assim é possível verificar o fluxo total sendo escoado através de cada *link*.
- *Etapa das variáveis X*: Com os fluxos de cada *link* calculados na etapa anterior, aloca-se para cada arco uma modularidade (variável X assume valor 1) igual ou superior ao fluxo total. Para aqueles casos em que o fluxo no *link* é identificado como nulo, a variável X é configurada com valor 0.

Ranking de Soluções (Seleção): a população inicial representa um conjunto de propostas de soluções factíveis para o problema apresentado. Então é necessário que cada elemento desse conjunto seja avaliado quantitativamente para que se possa definir a qualidade de cada solução. Para o AG desenvolvido, a própria função objetivo do MILP é utilizada como função de aptidão. Dessa forma as soluções têm sua qualidade avaliada de acordo com o custo apresentado. Sendo que, quanto menor o custo melhor o indivíduo.

Agora, para o processo de *crossover* é necessário que se faça uma seleção dos indivíduos a serem cruzados. A seleção por torneio é realizada através do sorteio de dois conjuntos de soluções retirados da população corrente. Em cada conjunto realiza-se um torneio onde apenas o melhor é selecionado. Com o melhor indivíduo de cada conjunto selecionado, tem-se um par de indivíduos para o *crossover*. Esse processo de seleção é realizado para cada *crossover* que ocorrerá em uma geração do algoritmo.

A quantidade de indivíduos sorteados da população inicial também é definida pelo planejador. Porém, quanto maior o conjunto maior também a pressão de seleção, pois as chances de que os mesmos indivíduos sejam selecionados aumentam, e esse fato diminui a diversidade da população.

Crossover: o cruzamento implementado, assim como a população inicial, acontece em duas etapas, sendo que a etapa das variáveis X não se altera. Assim, é definido aleatoriamente um ponto de corte na cadeia de variáveis Y, com a restrição de que caminhos de uma mesma demanda não podem ser separados por este ponto de corte. Isso acontece pois futuramente esse processo pode representar a duplicação de uma demanda dentro da rede o que modificaria todo o modelo, e tornaria o indivíduo inevitavelmente ineficaz. Assim as possibilidades de pontos de corte limitam-se ao número de demandas a serem escoadas na rede, respeitando a quantidade de caminhos candidatados para cada demanda.

O ponto de corte é responsável por dividir a parcela Y do indivíduo em duas partes. A parte esquerda do primeiro indivíduo será concatenada com a parte direita do segundo, e vice-versa. Dessa forma gera-se dois “filhos”, ou seja, duas novas soluções possíveis da rede, e que tendem a ser melhores que as duas anteriores.

Após o procedimento de *crossover* executado na parcela Y da solução, cada filho gerado tem sua parcela X criada, permitindo a sua avaliação.

Apenas um filho poderá permanecer na próxima geração. A escolha do indivíduo segue a seguinte prioridade:



1ª – *duas soluções factíveis*: o indivíduo “filho” de menor custo irá compor a próxima geração.

2ª – *apenas uma solução factível*: o indivíduo “filho” factível é selecionado.

3ª – *nenhuma solução factível*: o operador de *crossover* é realizado novamente com outros pontos de corte até encontrar uma solução factível, ou seja, um indivíduo “filho” factível.

Vale lembrar que o operador de cruzamento descrito acima é controlado por uma probabilidade de ocorrência definida pelo planejador. O operador de *crossover* só acontece caso a probabilidade seja atendida. Portanto, para o caso de não ocorrer *crossover*, o indivíduo “pai” é simplesmente mantido na próxima geração.

Mutação: o novo módulo de população (composto pelos novos indivíduos gerados no processo de *crossover*) pode sofrer leves alterações aleatórias nos caminhos escolhidos para escoar cada demanda. Este procedimento é realizado para garantir a diversidade da população no decorrer das gerações, diminuindo a probabilidade de convergência para um mínimo local.

A mutação não acontece em todos os indivíduos. Uma probabilidade de ocorrência também é definida para realizar o controle desse operador. Sendo que uma taxa de probabilidade muito alta pode representar uma desconstrução da solução no decorrer das gerações.

A mutação acontece também na parcela das variáveis Y. Consequentemente, a parcela X necessita ser definida novamente, conforme realizado na etapa 2 de criação da população inicial.

## 6. Cenário Avaliado

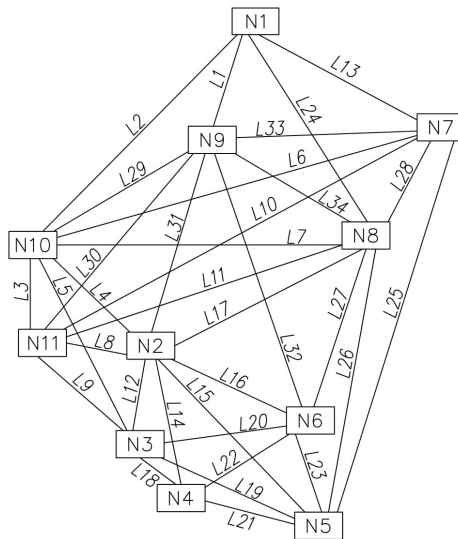
O cenário de aplicação escolhido para avaliar o desempenho da metodologia é formado por uma das instâncias contidas na SNDlib (2019). A instância da biblioteca SNDlib utilizada neste trabalho utiliza a tecnologia de transmissão óptica PDH e possui as características indicadas na Tabela 2.

**Tabela 2. Instância da Biblioteca de Redes SNDLib.**

<b>Filtro de Modelo</b>	
Modelo de Demanda: Demanda não direcional	(U)
Modelo de Link: Links não direcionais	(U)
Modelo de Cap. do Link: Cap. de links explícitos	(E)
Modelo de carga fixa: Sem custo de carga fixa	(N)
Modelo de roteamento: Caminho Simples	(S)
Modelo de caminho admissível: Todos os caminhos	(A)
Modelo <i>hop-limit</i> : Sem <i>hope limits</i>	(N)
Modelo de sobrevivência: Sem sobrevivência	(N)

A rede escolhida é composta de 11 nós (vértices) e 34 *links* (arestas), com possibilidade de alocação de sistemas de transmissão com níveis hierárquicos de até

565,148 Mbps, com capacidade de 1920 canais E1 (unidade de roteamento base de 2,048 Mbps).



**Figura 3. Topologia da rede candidata [13].**

A Figura 3 apresenta a topologia desta rede. No total, 24 demandas previstas devem ser atendidas integralmente [13]. Os custos de instalação de cada modularidade (capacidade) da tecnologia PDH candidata, em canais E1 (30, 480 e 1920), em cada *link* previsto, também são aqueles utilizados em [SNDlib 2019]. O custo do *link* é contabilizado caso ele seja escolhido para ser parte integrante da rede solução.

## 7. Resultados

Conforme mencionado anteriormente, diferentes parâmetros podem ser utilizados como argumentos para o sistema de apoio à decisão desenvolvido. A metodologia pode ser aplicada a diferentes cenários de rede de transporte óptica, diferentes tipos de tecnologias de transmissão e diferentes matrizes de interesse de tráfego. Naturalmente, para as mesmas variáveis de entrada, se os parâmetros dos dados são diferentes, como por exemplo os caminhos pré-computados para cada demanda, as soluções alcançadas também irão mudar.

O sistema de apoio à decisão desenvolvido através da computação evolucionária foi testado em uma rede de dimensão média, descrita na Seção 6. Para cada demanda prevista,  $k=5$  caminhos foram gerados. Este valor de  $k$  permite uma boa variedade de combinações de caminhos a serem analisados mantendo o tempo de processamento em um valor relativamente baixo. A métrica utilizada para a candidatura dos  $k$ -caminhos foi a geração automática utilizando uma versão modificada do algoritmo de  $k$ -caminhos mais curtos [Martins 2017]. A distância total compreendida entre o nó de origem e o nó de destino, em *km*, é utilizada como fator de decisão.

A Tabela 3 descreve as cinco configurações do algoritmo genético utilizadas para avaliar a rede. Estas configurações do AG foram escolhidas de forma a avaliar o desempenho da metodologia ao privilegiar alguns de seus parâmetros, além do objetivo principal que é dimensionar a rede a custo mínimo.

**Tabela 3. Configurações do AG Proposto.**

Parâmetro	Configuração do AG				
	1	2	3	4	5
População	100	200	500	100	500
Gerações	50	50	500	50	50
Crossover (Probabilidade)	0,9	0,6	0,9	0,6	0,6
Mutação (Probabilidade) / Quant. Alterações)	0,05 / 5	0,10 / 5	0,05 / 5	0,05 / 5	0,10 / 5

A Tabela 4 lista os resultados comparativos entre o Sistema de Apoio a Decisão (SAD) desenvolvido neste trabalho e aquele indicado na SNDLib. Em termos de custo da rede dimensionada, a metodologia proposta neste trabalho apresentou desempenho superior ao da SNDLib em todas as configurações do AG. Vale observar que para obter um custo mais baixo o AG dimensionou a rede com uma carga instalada total menor (chegando a até 40% a menos), comprometendo a ocupação da rede (capacidade média utilizada até 7% a mais).

**Tabela 4. Resultados Obtidos.**

Metodologia		Resultados			
		Custo (\$)	Carga Instalada (Canais E1)	Capacidade Utilizada (%)	Tempo (s)
SNDLib <sup>a</sup>		14.883.708	13.440	65,08	3.600 <sup>b</sup>
AG Proposto	1	14.765.752	11.040	70,90	1.133
	2	12.966.484	8.160	71,90	3.200
	3	14.495.788	10.560	67,30	5.838
	4	14.511.654	10.080	67,50	925
	5	13.785.492	9.600	65,20	1.001

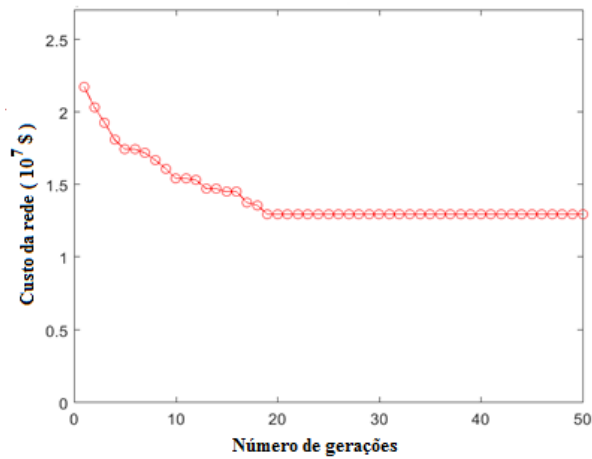
<sup>a</sup> Resultado da biblioteca SNDLib.

<sup>b</sup> Tempo limite.

Embora não seja possível fazer uma comparação completamente fiel quanto ao desempenho computacional, por não conhecer o processo e a métrica de candidatura de caminhos na SNDLib, os resultados alcançados pelo AG apontam que a ferramenta implementada neste trabalho possui um grande potencial de aplicação. Afinal, mesmo a solução ótima sendo fortemente influenciada pelos caminhos pré-computados, a metodologia adotada neste trabalho obteve redes com níveis de investimento inferiores ao da SNDLib, só que necessitando de tempos de simulação computacional bem menores. Apenas o AG-3 apresentou tempo computacional maior que o da SNDLib. Este resultado evidencia que o AG configurado para uma população com quantidade elevada de indivíduos e acrescido de um número elevado de gerações compromete o seu desempenho computacional e não garante as melhores soluções de rede.

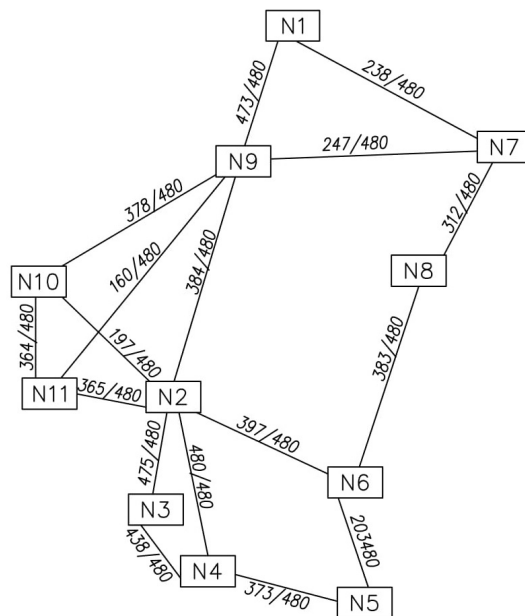
A rede de menor custo encontrada evidencia que a diversidade é um fator relevante na obtenção da melhor solução (configuração AG-2). Uma quantidade maior de operações de *crossover* e de mutação mostrou ser mais eficiente do que aumentar o tamanho da população e o número de gerações.

A Figura 4 descreve o comportamento do custo da rede obtida com o AG-2, conforme se avança no número de gerações. As reduções no custo de rede ocorrem até em torno da vigésima geração, evidenciando ainda mais a importância de se investir mais na diversidade do que na quantidade de soluções.



**Figura 4. Custo da rede como uma função do número de gerações obtido pela configuração AG-2.**

A topologia da rede solução obtida com a simulação AG-2 pode ser conferida na Figura 5. Em cada *link* escolhido são indicados o fluxo escoado e a capacidade alocada (fluxo/capacidade). Nos resultados disponibilizados na SNDLib, dos 34 *links* que foram candidatados 13 foram instalados, sendo 8 de 480xE1 e 5 de 1.920xE1. Já a rede projetada pelo AG-2 privilegiou os *links* com capacidade de 480xE1 (17 *links*).



**Figura 5. Topologia da rede solução obtida pela configuração AG-2.**

## 8. Conclusões

O constante desenvolvimento do mercado de telecomunicações tem obrigado as operadoras do setor a buscarem novas soluções de planejamento de suas redes. Os objetivos a serem alcançados procuram utilizar técnicas de otimização que possam aliar tanto a minimização de custos quanto a maximização das receitas.

Este trabalho apresentou uma proposta de planejamento estratégico orientado à minimização de custos para a infraestrutura de redes de transporte óptica. A rede é vista como um grafo e, seguindo a abordagem arco-caminho, a modelagem foi traduzida como um problema de programação linear inteira mista, com variáveis binárias, o qual obedece a restrições de atendimento de demanda, capacidade técnica de equipamentos e exigências de exclusividade. A técnica de resolução utilizada para resolver o modelo de otimização MILP 0-1 foi a implementação de um algoritmo genético.

Os resultados preliminares alcançados são animadores quanto ao desempenho da ferramenta computacional desenvolvida, com destaque para a facilidade de adaptação da modelagem para atender novos requisitos e/ou especificidades de rede e tecnologia a serem avaliadas. Em termos de qualidade das soluções alcançadas vale destacar que a metodologia desenvolvida neste trabalho foi confrontada com os resultados de um repositório *on-line* para estudos de redes de transporte ópticas. Em sua maioria, os resultados de rede obtidos neste trabalho foram melhores, seja pela qualidade das soluções obtidas, seja para o desempenho em termos de tempo computacional necessário. A melhor solução encontrada apresentou uma redução no custo total da rede em torno de 13%.

As atividades que podem ser apontadas como extensões deste trabalho são: adaptações do modelo de otimização para atender as especificidades da rede OTN/DWDM [10]; especificação de uma rede real para análise e estudo de caso; análise utilizando modelagem *Fuzzy* para a representação de dados imprecisos de demanda; e estudos sobre a possibilidade de modelagem multiobjetivo, confrontando mínimo custo e máxima folga da rede.

## Referências

- Ahuja, S.; Korkmaz, T.;Krunz, M. (2004). Minimizing the differential delay for virtually concatenated Ethernet over SONET systems. In Proc. ICCCN 2004, pp. 205–210.
- Assis, K. D. R.; I. Queiroz; R.C Almeida; H. Waldman. (2013). MILP formulation for resource optimization in Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Networks. Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), SBMO/IEEE MTT-S International.
- Bazaraa, M. S.; Jarvis, J. J.; Sherali, H. D. (2010). Linear Programming and Network Flows. 4a ed., Willey, New York.
- Eira, A.; Santos, J.; Pedro, J.; Pires, J. (2014). Multi-objective Design of Survivable Flexible-Grid DWDM Networks. J. OPT. COMMUN. NETW./VOL. 6, NO. 3.
- ITU-T Recommendation G.709. (2012). Interfaces for the Optical Transport Network (OTN).
- Kumar, A. e Gupta, M. (2017). A review on activities of fifth generation mobile communication system. Alexandria Engineering Journal.

- Jeszensky, P. J. E. *Sistemas Telefônicos*. Manole, Barueri-SP. 2004.
- Li, S., Da Xu, L., & Zhao, S. (2018). 5G internet of things: A survey. *Journal of Industrial Information Integration*.
- Linden, R. *Algoritmos Genéticos* (3ª ed.). Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda. 2012.
- Martins, E.; Pascoal, M. (2017). An algorithm for ranking optimal paths. [www.mat.uc.pt/~marta/Publicacoes/rank\\_optimal.ps.gz](http://www.mat.uc.pt/~marta/Publicacoes/rank_optimal.ps.gz).
- Mumtaz, S. Morgado, A. K. M. S. Huq e J. Rodriguez. (2017). A survey of 5G technologies: Regulatory, standardization and industrial perspectives. *Digital Communications and Networks*.
- Orlowski, S.; Wessaly, R.; Pióro, M.; Tomaszewski, A. (2010). SNDlib 1.0 - Survivable network design library. *Networks*, 55(3), 276-286.
- Santos, J. R.; Eira, A.; Pires, J. (2017). A Heuristic Algorithm for Designing OTN Over Flexible-Grid DWDM Networks. *Journal of Communications* Vol. 12, No. 9.
- Simmons, J.M. (2014). *Optical Network Design and Planning*, Springer International Publishing Switzerland.
- SNDlib - Survivable Network Design library - <http://sndlib.zib.de>. 2019.
- Srivastava, A.; Srivastava, A. (2006). Flow aware differential delay routing for next-generation Ethernet over SONET/SDH. In *Proc. IEEE ICC 2006*, pp. 140–145.
- Tessinari, R. S. (2011). *Integração do Plano de Transporte com os Planos de Controle e de Gerência em Redes OTN: Uma Abordagem Via Simulação*. Dissertação de Mestrado. Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória.
- Wang, Q.; Ying, G. (2012). OTN for the Future Transmission Network. *Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPO)*.