



SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA O PLANEJAMENTO OTIMIZADO DE REDES DE TRANSPORTE ÓPTICAS

Bruno Quirino de Oliveira^{*1,2}, Victor Honorato Cunha², Lucas de Carvalho Guimarães², Herberth Vinicius da Silva Pinto Júnior², Flávio Henrique Teles Vieira¹, Marcos Antônio de Sousa^{1,2}

¹UFG – Universidade Federal de Goiás

²PUC Goiás – Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Resumo - Este artigo apresenta um sistema de apoio à decisão para o dimensionamento de redes ópticas de transporte. É considerado o problema de planejamento de rede óptica em que é especificada uma matriz de interesse de tráfego entre os nós de demanda, que inclui quantidade de canais ou taxas de transmissão. A rede é modelada como um grafo, através da abordagem arco-caminho. Um modelo de Programação Linear Inteira Mista com variáveis 0-1 é desenvolvido para minimização de custo. Restrições de garantia de demanda, de capacidade técnica de equipamentos e de exclusividade na modularidade de enlace também são abordadas. Resultados da simulação do modelo de otimização para uma rede de médio porte são apresentados e discutidos.

Palavras-Chave – MILP, Otimização de redes e Redes ópticas.

DECISION SUPPORT SYSTEM FOR THE OPTIMIZED PLANNING OF OPTICAL TRANSPORT NETWORKS

Abstract - 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, which includes the number of channels or transmission rates. The network is modeled as a graph, through the arc-path approach. A Mixed Integer Linear Programming model with variables 0-1 is designed to minimize cost. 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.

Keywords – MILP, Network optimization and Optical networks.

I. 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^a e 5^a geração. O impacto imediato da implantação e utilização destas tecnologias surge com a necessidade se ter uma rede de telecomunicações com alta capacidade na transmissão de dados.

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*) [1] 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.

Nestas circunstâncias, a rede de transporte óptica (OTN - *Optical Transport Network*) vem sendo apontada como a responsável pela evolução das redes PDH e SDH [2]. A rede OTN, acrescida da versatilidade da Multiplexação Densa por Divisão de Comprimento de onda (DWDM - *Dense Wavelength Division Multiplexing*), elimina a complicação do transporte de dados com a Multiplexação por Divisão de Tempo (TDM - *Time Division Multiplexing*) presente nas

*brquirino@gmail.com

redes PDH e SDH [3]. Segundo a recomendação G.709 da ITU-T [4], 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 flexível de alta capacidade de transmissão, fornece isolamento de falhas e melhora da resolução de problemas.

Nestas circunstâncias, é evidente que a rede óptica sempre terá que se adaptar com as evoluções tecnológicas, e assim 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 rede.

Diferentes problemas de otimização têm sido 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*). O MILP 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.

II. O PROBLEMA

O problema de planejamento de redes de transporte ópticas é complexo e de difícil solução [5]. 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.

A. Representação da Rede

Neste trabalho, o modelo de fluxo em rede (grafos) [6] é utilizado para representar o problema de planejamento da rede de transporte. A Figura 1 ilustra 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 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 (Figura 1) possui cinco nós de demanda.

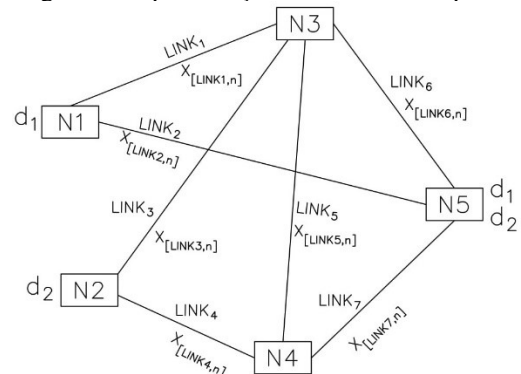
Demanda Prevista

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 : Demanda prevista para ser atendida entre o nó 1 e o nó 5;

d_2 : Demanda prevista para ser atendida entre o nó 5 e o nó 2.

Figura 1: Representação da rede de transporte.



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.

Tabela 1: Valores de demanda prevista (em minutos).

Demanda	Caminhos	LINKs
d_1	P ₁	LINK2
	P ₂	LINK1 → LINK6
	P ₃	LINK7 → LINK4
d_2	P ₄	LINK6 → LINK3
	P ₅	LINK6 → LINK5 → LINK4

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.

A Tabela 1 indica que uma parcela da demanda d_1 pode ser escoada por um caminho P_1 e outra parcela dessa mesma demanda por um caminho P_2 diferente do primeiro. Esta escolha é feita através de variáveis de decisão do tipo real, $Y[\text{caminho}, \text{demanda}]$, que especificam a parcela da demanda (por exemplo d_1), que será escoada pelo caminho (por exemplo P_1).

B. 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 quer alcançar e a abrangência da rede a ser dimensionada.

O trabalho de [7] 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 [8].

Para redes SDH, mecanismos de roteamento de demanda com múltiplos caminhos são propostos em [9], [10] e [11]. 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 [12] 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 [13] é proposto um algoritmo heurístico para resolver o problema de roteamento no contexto das redes OTN / DWDM de rede flexível. 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 [14] apresenta uma modelagem multiobjetivo para otimizar a implantação de rede OTN/WDM com diversidade de canal e com diferentes graus 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.

III. 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 [6].

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* $[i] \in \text{LINK}$;

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

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

Ω: 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 $[k] \in \text{DEM}$, atendida pelo caminho $[j] \in \text{P}_k$;

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

d_k: demanda $[k] \in \text{DEM}$ 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:

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

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

$$\sum_{[n] \in \text{O}_{\text{LINK}}} \text{Cap}_n X_{in} - \sum_{[j] \in \Omega_i} Y_{kj} \geq 0, \quad \forall [i] \in \text{LINK} \quad (3)$$

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

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.

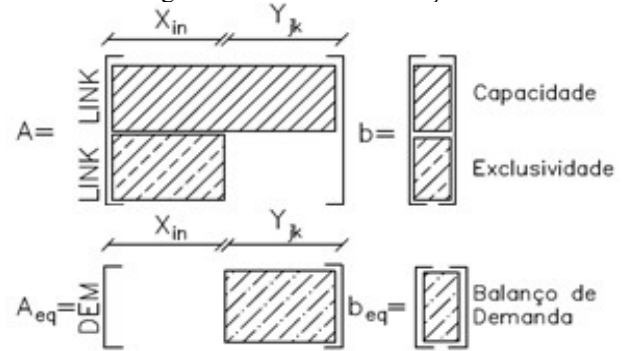
A escalabilidade do modelo é comprometida pela sua complexidade, de acordo com o número de variáveis (principalmente as binárias) e restrições requeridas. Admitindo um cenário de pior caso, onde todas as demandas podem ser atendidas cada uma por k caminhos factíveis, através de links que apresentam todas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

IV. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO

Para resolver o problema foi utilizado o solver para problemas MILP do *software* MATLAB®, o *intlinprog*. A primeira tarefa realizada foi importar todas as informações da rede para o ambiente de programação do MATLAB®. A função objetivo foi escrita separadamente em um arquivo *.m* que que é utilizado nas avaliações feitas pelo *solver*. Uma vez que a *Toolbox* de otimização do MATLAB® utiliza o formato de modelagem matricial, as restrições foram criadas de acordo com esta orientação. A Figura 2 ilustra a estrutura das matrizes que modelam as restrições.

O número de variáveis X_{in} e Y_{jk} , descritas na seção 2, representa a quantidade de colunas das matrizes A e A_{eq} . Na matriz A (restrições de desigualdade, do tipo menor ou igual) o conjunto de restrições de capacidade envolve todas as variáveis do problema, conforme conjunto de restrições (3). As restrições de exclusividade, dependem apenas das variáveis X_{in} , conforme conjunto de restrições (4). O número total de restrições da matriz A é igual a quantidade de linhas, que neste caso: $2*LINK$ (conjunto de *links* do problema).

Figura 2: Matrizes de restrições.



Já na matriz A_{eq} (equações) estão contidas as restrições de balanço de demanda que dependem apenas das variáveis Y_{jk} , conforme conjunto de restrições (2). O número de linhas da matriz A_{eq} é igual ao número de elementos do conjunto *DEM* (quantidade de demandas do problema). Os vetores b e b_{eq} contêm os valores dos dados referentes ao lado direito de cada restrição.

Após a definição da função objetivo e das restrições, ainda é necessário determinar os limites superiores e inferiores de cada variável de decisão. Isso é feito através de dois vetores de comprimento igual ao número de variáveis de decisão X_{in} e Y_{jk} .

V. CENÁRIO AVALIADO

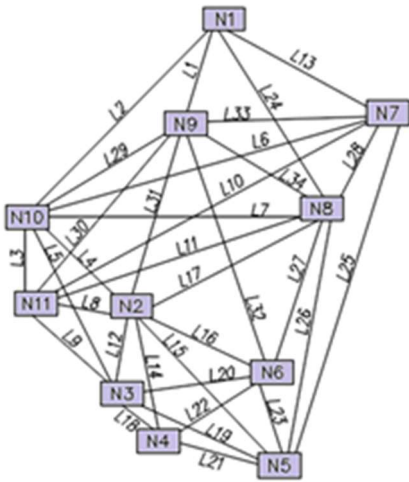
A ferramenta computacional desenvolvida foi testada em uma das instâncias contidas na SNDlib [11]. A instância da biblioteca SNDlib utilizada neste trabalho possui as seguintes características: as demandas e os *links* devem obedecer a mesma forma de roteamento sendo não direcionais (U-U), a capacidade dos *links* é explícita (E), não possui custo fixo de instalação (N), as demandas podem ser escoadas por mais de um caminho (C), todos os caminhos existentes podem ser utilizados (A), e não estão previstas infraestruturas de garantia de sobrevivência da rede a possíveis falhas (N). A Tabela 2 resume essas informações com os parâmetros considerados.

Tabela 2: Instâncias da Biblioteca de Redes SNDlib.

Filtro de Modelo	
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 Único	(C)
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). A Figura 3 apresenta a topologia desta rede.

Figura 3: Topologia da rede candidata.



No total, 24 demandas previstas devem ser atendidas integralmente, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Valores de demanda previstos.

Demanda	Entre os nós	Valor Médio (em canais E1)	Demanda	Entre os nós	Valor Médio (em canais E1)
D1	N9-N2	384	D13	N5-N8	108
D2	N3-N4	215	D14	N4-N5	105
D3	N7-N8	212	D15	N9-N8	100
D4	N10-N3	197	D16	N11-N3	99
D5	N9-N11	160	D17	N5-N6	95
D6	N2-N8	160	D18	N2-N3	278
D7	N2-N5	144	D19	N11-N2	266
D8	N1-N7	138	D20	N9-N10	263
D9	N3-N5	124	D21	N1-N9	258
D10	N6-N8	115	D22	N9-N7	247
D11	N1-N10	115	D23	N2-N6	237
D12	N10-N11	364	D24	N2-N4	237

O custo de instalação de cada modularidade (capacidade) da tecnologia candidata, em canais E1 (30, 480 e 1920), em cada link previsto pode ser encontrado em [8]. O custo do link é contabilizado caso ele seja escolhido para ser parte integrante da rede solução

VI. RESULTADOS

Conforme mencionado anteriormente, diferentes parâmetros podem ser utilizados como argumentos para o sistema de apoio à decisão desenvolvido. O modelo pode ser executado para diferentes variáveis de entrada, ou seja, diferentes cenários de rede de transporte óptica, diferentes tipos de tecnologias de transmissão e diferentes matrizes de interesse de tráfego. Assim, para as mesmas variáveis de entrada, se os parâmetros 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 foi testado em uma rede de dimensão média, descrita na seção 5. Para cada demanda prevista (Tabela 3), $k=5$ 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. Foram utilizadas duas métricas para a candidatura dos caminhos:

- SAD-01 - geração automática de caminhos: utiliza uma versão modificada do algoritmo de k -caminhos mais curtos proposto em [15]. A distância total compreendida entre o nó de origem e o nó de destino, em km, é utilizada como fator de decisão;

- SAD-02 - geração pela experiência do planejador: A candidatura dos caminhos é feita de forma manual. Este procedimento procura valorizar a experiência do planejador no processo decisório, através do seu conhecimento da rede, ao escolher os links que compõem um determinado caminho candidato.

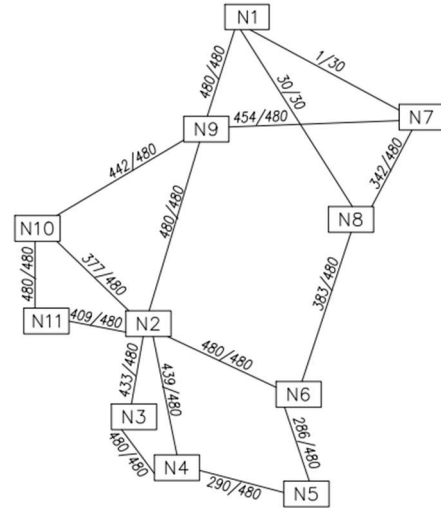
A Tabela 4 apresenta os resultados comparativos entre a SNDlib e o Sistema de Apoio a Decisão (SAD) desenvolvido neste trabalho.

Tabela 4: Resultados SNDlib x SADs.

Resultados	SNDlib	SAD-01	SAD-02
Custo \$ (x1000)	11.114.202	11.467.723	11.114.202
Capacidade Instalada (xE1)	6780	7.260	6.780
Capacidade Utilizada média (%)	91,38	86,58	90,22
Tempo (s)	50,00	3,50	1,30

A rede solução do SAD-02 é ligeiramente diferente daquela obtida na SNDlib, embora apresente o mesmo custo de instalação e praticamente a mesma taxa média de ocupação (em torno de 90%).

Figura 4: Rede Solução do SAD01.



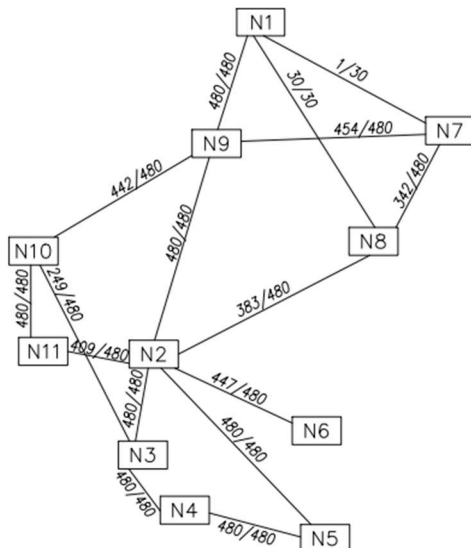
A rede solução alcançada pelo SAD-01 é a que oferece maior folga média na utilização dos seus links (em torno de 5% a mais). Mas esta vantagem é comprometida com a necessidade de um orçamento 3,18% mais elevado.

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 SAD 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 o mesmo nível de investimento da SNDlib, só que

necessitando de tempos de simulação computacional bem menores.

As topologias das redes obtidas com a simulação dos SAD-01 e SAD-02 podem ser conferidas nas Figuras 4 e 5, respectivamente. Estão indicados o (*fluxo escoado/capacidade alocada*) em cada *link* escolhido.

Figura 5: Rede Solução do SAD02.



Nos resultados disponibilizados na SNDlib dos 34 *links* que foram candidatados 13 foram instalados, sendo 8 de 480xE1 e 5 de 1.920xE1. Já as redes projetadas pelos SAD-01 e SAD-02 privilegiaram os *links* com capacidade de 480xE1 (15 *links*). Mesmo apresentando uma folga média maior na rede, o SAD-01 não alocou *links* de alta capacidade (1920xE1).

VII. 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 para 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, o qual obedece a restrições de atendimento de demanda, capacidade técnica de equipamentos e exigências de exclusividade.

O modelo de otimização foi implementado para utilizar a *toolbox* de otimização do *software* MATLAB®, bem como dados de rede disponibilizados para teste em um repositório. 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.

As atividades que podem ser apontadas como extensões deste trabalho são: adaptações do modelo de otimização para atender as especificidades da rede OTN sobre DWDM [13];

especificação de uma rede real para análise e estudo de caso; estudos sobre a possibilidade de modelagem multiobjetivo, confrontando mínimo custo e máxima folga da rede; análise utilizando Lógica *Fuzzy* para a representação de dados imprecisos; e técnicas de solução do modelo de otimização utilizando meta-heurísticas, como, por exemplo, Algoritmos Genéticos, para análise de redes de grande dimensão.

REFERÊNCIAS

- [1] Jeszensky, P. J. E. Sistemas Telefônicos. Manole, Barueri-SP. 2004.
- [2] Wang, Q.; Ying, G. (2012). OTN for the Future Transmission Network. Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPO).
- [3] 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.
- [4] ITU-T Recommendation G.709. (2012). Interfaces for the Optical Transport Network (OTN).
- [5] Simmons, J.M. (2014). Optical Network Design and Planning, Springer International Publishing Switzerland.
- [6] Bazaraa, M. S.; Jarvis, J. J.; Sherali, H. D. (2010). Linear Programming and Network Flows. 4a ed., Wiley, New York.
- [7] Orłowski, S.; Wessaly, R.; Pióro, M.; Tomaszewski, A. (2010). SNDlib 1.0 - Survivable network design library. Networks, 55(3), 276-286.
- [8] SNDlib - Survivable Network Design library (2018) - <http://sndlib.zib.de>.
- [9] 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.
- [10] Ou, C.; Sahasrabudhe, L.H.; Zhu, K.; Martel, C.U.; Mukherjee, B. (2006). Survivable virtual concatenation for data over SONET/SDH in optical transport networks. IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 14, no. 1, pp. 218–231.
- [11] Ahuja, S.; Korkmaz, T.; Krunk, M. (2004). Minimizing the differential delay for virtually concatenated Ethernet over SONET systems. In Proc. ICCCN 2004, pp. 205–210.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Martins, E.; Pascoal, M. (2017). An algorithm for ranking optimal paths. www.mat.uc.pt/~marta/Publicacoes/rank_optimal.ps.gz.