

# Projeto Completo de Redes Ópticas em Hierarquia

<sup>1</sup>Marcelo O. Lima, <sup>1</sup>Fabio O. Lima, <sup>1</sup>Marcelo E. V. Segatto, <sup>1</sup>Elias S. Oliveira e <sup>2</sup>Renato T. R. Almeida  
Laboratório de Telecomunicações, <sup>1</sup>Universidade Federal do Espírito Santo, <sup>2</sup>Instituto Federal do Espírito Santo  
e-mail: marcelo.olima@gmail.com

**Resumo**—Este artigo apresenta uma metodologia para o projeto físico e lógico de redes ópticas de comunicação com topologias hierárquicas. São determinadas as topologias lógica e física, além do roteamento e designação de comprimentos de onda, em função da localização geográfica dos nós da rede. A metodologia proposta consiste de três etapas que integram uma meta-heurística, inferência estatística e um modelo de programação linear inteira-mista. Na primeira um algoritmo genético define a estrutura hierárquica da rede óptica. Em seguida, um procedimento estatístico gera estimativas para parâmetros de interesse que serão fornecidos como exigência de qualidade para o projeto, limitando as variáveis do modelo de programação matemática, resolvido na última etapa. São apresentados resultados de experimentos com o objetivo de validar a eficiência desta formulação com relação à qualidade das soluções e viabilidade quanto ao desempenho computacional, tendo como base de comparação limites inferiores para as métricas a serem otimizadas.

**Palavras Chave:** Redes ópticas, Otimização combinatória.

## I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de metodologias de projeto de redes ópticas de comunicações se intensificou após o advento da tecnologia de multiplexação por comprimento de onda (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*). Além de possibilitar a implementação de vários canais de comunicação na mesma fibra óptica em diferentes comprimentos de onda, esta tecnologia permite a implementação de redes com roteamento de tráfego por comprimentos de onda (WRON - *Wavelength Routed Optical Networks*). As vantagens desse tipo de rede decorrem de sua infra-estrutura flexível, com elevada capacidade e confiabilidade na transmissão de dados.

No projeto de WRON técnicas de otimização são largamente empregadas e as soluções propostas fazem uso de métodos exatos e heurísticas. Na literatura, o projeto completo de WRON é dividido em dois sub-problemas [1], que são denominados: VTD (*Virtual Topology Design*) e RWA (*Routing and Wavelength Assignment*). Esta divisão em sub-problemas é colocada como necessária para que se possa lidar com a extrema complexidade computacional das formulações de programação matemática que abordam o projeto completo de WRON. No entanto, em [2], [3] foi apresentada uma modelagem para o projeto completo de WRON, denominada TWA (*Traffic over Wavelength Assignment*), capaz de tratar desde a escolha da topologia física da rede até a definição da topologia virtual, incluindo a distribuição de tráfego, a definição das rotas físicas e a designação e o roteamento de comprimentos de onda. Este modelo possui um reduzido número de variáveis e restrições, se comparado a modelos que resolvem apenas o RWA [4].

As metodologias de projeto de WRON mais estudadas na literatura consideram topologias em malha para as redes ópticas. No entanto, existem trabalhos que exploram redes com topologias hierárquicas, mais precisamente as implementadas na forma de anéis hierárquicos [5], [6], [7]. Contudo, até onde possuímos conhecimento, o projeto de topologias hierárquicas em malha ainda não foi explorado, sendo esta a principal contribuição deste trabalho. A metodologia de projeto de WRON proposta considera que existe uma sub-rede na hierarquia superior que será chamada de *backbone*, cujos nós pertencem cada um a uma sub-rede de hierarquia inferior, chamada *cluster*.

O objetivo principal da metodologia proposta neste trabalho é viabilizar o projeto completo de redes com topologias hierárquicas em malha. Considera-se como dados de projeto a disposição geográfica dos nós da rede e as demandas de tráfego esperadas entre os mesmos.

Uma simplificação adotada é que as ligações entre os *clusters* e o *backbone* serão opacas, ou seja, todos os componentes de uma ligação lógica estão em um mesmo nível da hierarquia. Deste modo, o *backbone* e os *clusters* podem ser vistos como redes independentes, exceto pelo tráfego que passa de um nível hierárquico para outro, chamado de tráfego de acesso. Este tráfego pode ser acumulado nos nós de acesso ao *backbone*, de modo que sua distribuição e roteamento podem ser feitos paralelamente em cada sub-rede.

Assim, para definir a estrutura hierárquica basta separar os nós da rede em conjuntos, que formarão cada *cluster*, e escolher em cada um qual será o nó de acesso ao *backbone*. Por sua vez, este último será formado pelo conjunto de nós de acesso, também chamados de super-nós [6], [7]. Portanto, com a possibilidade de agregar e atribuir o tráfego de acesso apenas aos super-nós, que passam a ser sua fonte e destino dentro das sub-redes, temos que cada uma delas pode ser projetada separadamente. Assim, ao se considerar que os super-nós são opacos, diminui-se o alto custo computacional que seria esperado ao se formular o problema de projeto completo de uma WRON considerando todos os seus nós simultaneamente.

Outra estratégia adotada foi definir parâmetros de qualidade satisfatórios para as variáveis de interesse, de modo que qualquer solução viável encontrada já seria suficiente para garantir a qualidade do projeto das sub-redes. As variáveis de interesse em questão são o congestionamento da rede, o total do tráfego retransmitido, o custo de instalação da rede física, o número de comprimentos de onda e o número total de transceptores utilizados ([8], [9], [10], [11]).

## II. PROJETO DE REDES EM HIERARQUIA

A metodologia proposta consiste em três etapas sequenciais. Na primeira, são fornecidos como dados as matrizes de tráfego e de distâncias. Um algoritmo genético faz a separação dos nós em sub-redes buscando minimizar o tráfego transferido entre as sub-redes, bem como a distância entre seus nós, ou seja, a evolução promovida pelo algoritmo genético concentra o tráfego no interior das sub-redes, e as forma com nós geograficamente próximos. Com isto pretende-se otimizar os requisitos de capacidade de processamento eletrônico de tráfego dos super-nós e também o custo de instalação dos enlaces físicos.

Na fase intermediária são definidos limites superiores (*upper bounds* - UB) para o congestionamento e o tráfego retransmitido na rede, por meio de inferência estatística baseada na média e desvio padrão de soluções viáveis para o VTD. Estes UB são impostos às variáveis do modelo TWA para garantir, com relação a estas métricas, a qualidade da solução a ser obtida na próxima etapa. Além dos UB, para validar os resultados, são também calculados limites inferiores (*lower bounds* - LB) para estas métricas. As formulações para os LB foram apresentadas em [3], e os UB são calculados a partir da média e do desvio padrão. Por fim, também são definidos UB para o custo de instalação física de cada sub-rede.

A última etapa consiste na resolução do modelo TWA para cada sub-rede, respeitando os *bounds* (UB e LB) calculados e visando utilizar o menor número possível de comprimentos de onda. O resultado desta última fase fornece a solução do projeto, representado pelas topologias física e lógica, bem como a forma de roteamento e alocação dos comprimentos de onda, em função da distribuição das demandas de tráfego esperadas. Esses resultados são referentes às sub-redes em separado, porém, quando são agrupados, representam o resultado global para uma WRON com topologia hierárquica em malha.

Como o número de comprimentos de onda multiplica a quantidade de variáveis do TWA, foi utilizada uma estratégia adotada anteriormente em [2]. Nesta estratégia tenta-se obter soluções com um comprimento de onda apenas e, caso não seja possível, incrementa-se esse número até que seja possível encontrar soluções viáveis. Por sua vez, o custo de instalação da rede física é controlado garantindo que seja menor, proporcionalmente, que o custo de uma rede real bem conhecida, a NSFNET [8]. Estamos considerando que o custo de instalação física é proporcional à distância entre os nós da rede, que determina o comprimento dos enlaces de fibra instalados entre os mesmos.

No projeto de topologias lógicas, o número de transceptores normalmente define as instâncias do problema [12], pois está relacionado com o dimensionamento dos nós da rede. Essa abordagem também foi utilizada, todavia, na literatura é comum definir o número exato de transceptores que cada instância possui [10]. Por outro lado, neste trabalho, o número de transceptores foi limitado a um valor pré-definido, permitindo que o modelo encontre soluções mais econômicas para este parâmetro.

### A. Estrutura Hierárquica

Na metodologia proposta, tanto a quantidade quanto o tamanho dos *clusters* estão sujeitos a um limite inferior igual a  $M_i$ . O algoritmo genético foi implementado com a biblioteca *Galib*, sendo utilizada a implementação *GADemeGA*, que mantém populações paralelas, com probabilidade de migração a cada geração da evolução [13]. Os parâmetros de configuração das funções da biblioteca *Galib* foram mantidos em seus valores padrão e demonstraram desempenho satisfatório. Além da codificação do cromossomo e da escolha das funções da *Galib* a serem utilizadas, o algoritmo genético se completa com a definição da sua função de avaliação, que atribuirá uma métrica de qualidade para os cromossomos (*fitness*) [14].

Dois parâmetros importantes no projeto de uma rede são os custos de instalação e operação da mesma [11]. Se as sub-redes forem formadas de modo que sejam constituídas por nós geograficamente próximos, haverá uma tendência se reduzir o custo de instalação dos enlaces. Por esse motivo, considera-se aqui a distância média entre os nós como a métrica de otimização do custo de instalação física.

Não obstante, se entre dois nós de *clusters* diferentes houver uma demanda de tráfego, ela teria necessariamente que ser processada eletronicamente em pelo menos dois nós do *backbone*, ou seja, a quantidade de tráfego de acesso seria incrementada. Definimos tráfego de acesso como sendo todo aquele que se origina em um *cluster* com destino a outro. Ele é computado apenas nos super-nós que fazem a sua interface entre hierarquias distintas, pois nos demais nós ele é contabilizado indistintamente como tráfego retransmitido.

A figura 1 ilustra o processo de decisão do genético, onde ele busca agrupar os nós fisicamente mais próximos e ao mesmo tempo seleciona em cada grupo, ou sub-rede, um nó que será utilizado como interface entre as demais sub-redes, de forma a minimizar o tráfego de acesso. Esses nós de acesso estão destacados no interior de cada sub-rede.

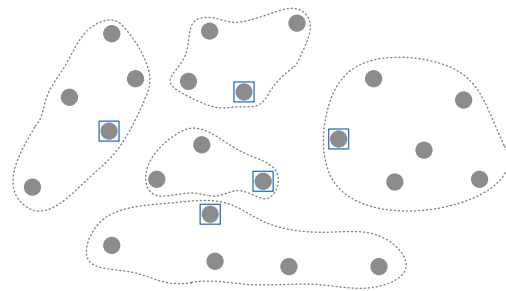


Figura 1. Ilustração do processo de decisão do genético.

Deste modo, a função objetivo do algoritmo genético foi definida como a distância média entre os nós das sub-redes ( $M$ ) somada com o total de tráfego de acesso ao *backbone* ( $T$ ). Esses valores podem ser calculados sem que seja necessário conhecer a estrutura completa da rede, basta sabermos a estrutura hierárquica, como foi definida acima.

Como resultado do algoritmo genético, além da estrutura hierárquica da rede, também são derivadas as matrizes de

demanda e distância de cada sub-rede. As matrizes de distâncias são apenas um subconjunto da original, enquanto que as matrizes de tráfego acumulam nos nós de acesso todo tráfego que deverá entrar no *cluster* e sair dele.

Nos experimentos que serão apresentados na próxima seção, as matrizes de tráfego e de distância possuem a mesma ordem de grandeza, podendo representar respectivamente a taxa de transferência de pacotes em *Gbits/s* e centenas de quilômetros de distância por exemplo. Fica claro que  $M$ , por ser uma média, tem ordem de grandeza bem inferior à de  $T$ , que é uma soma simples. Portanto, para garantir o equilíbrio entre as duas métricas, um pré-processamento deve ser feito para estabelecer uma proporção que deixe  $M$  e  $T$  com a mesma ordem de grandeza. Feito isso, também é possível atribuir pesos para cada um, conforme for o interesse do estudo de caso em questão. A função de avaliação do algoritmo genético, faz uso de um fator de calibração ( $C_a$ ) a fim de tornar  $M$  e  $T$  compatíveis em termos de ordem de grandeza.

### B. Qualidade do Projeto das Sub-Redes

Nesta seção serão explicados os critérios de qualidade assumidos para as sub-redes e a forma como eles são estabelecidos.

1) *Congestionamento e Tráfego Retransmitido*: Foram geradas aleatoriamente, para cada grau lógico, amostras de soluções para a topologia lógica da rede. Modelos de programação linear foram implementados em *AMPL* [15] para distribuir o tráfego da rede sobre cada topologia lógica, utilizando o resolvidor linear *GLPK* (*GNU Linear Programming Kit* - [gnu.org/software/glpk](http://gnu.org/software/glpk)). Assim, para cada solução viável da amostra é obtida a distribuição de tráfego ótima para o congestionamento da rede e também para o tráfego retransmitido [9]. Dessa forma estimamos a média e o desvio padrão das populações para o congestionamento e para o tráfego retransmitido, garantindo a representatividade de cada amostra.

Para cada parâmetro estatístico estimado, utilizamos o método interativo apontado por [16]. Para a média, o intervalo de confiança pode ser obtido da equação II.1 [16], onde  $e$  é a margem de erro, a amplitude de intervalo de confiança,  $Z_p$  é a distribuição normal reduzida,  $\alpha$  é o nível de confiança exigido,  $\sigma$  é o desvio padrão populacional e  $n$  é o tamanho da amostra.

$$e = Z_{(\alpha/2)} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{II.1})$$

Mas desejamos, a partir de uma margem de erro dada, estimar o tamanho de amostra necessária. Resolvendo a equação acima para  $n$ , temos a equação II.2, onde  $n$  agora é a estimativa para o tamanho da amostra.

$$n = \left( \frac{Z_{(\alpha/2)} \cdot \sigma}{e} \right)^2 \quad (\text{II.2})$$

Embora não conheçamos o desvio padrão populacional  $\sigma$ , a relação II.3 a seguir permite a substituição pela sua estimativa amostral  $s$  [16], onde  $t_{(n-1,p)}$  é a distribuição  $t$  de *Student* com  $n - 1$  graus de liberdade, que faz compensar o efeito da maior incerteza embutida pelo uso de  $s$  no lugar de  $\sigma$ .

$$t_{(n-1,p)} \cdot s = Z_p \cdot \sigma \quad (\text{II.3})$$

Assim, ficamos então com a equação II.4, onde  $n'$  é o tamanho da amostra utilizada para calcular  $s$ . Agora, se  $n \leq n'$ , a amostra já terá sido suficiente para estimar a média. Caso contrário, mais elementos devem ser retirados aleatoriamente da população e adicionados à amostra, até que esta forneça uma estimativa  $n \leq n'$ .

$$n = \left( \frac{t_{(n'-1,\alpha/2)} \cdot s}{e} \right)^2 \quad (\text{II.4})$$

Procedemos de forma análoga para estimar o tamanho de amostra representativa para a estimativa do desvio padrão, cujo intervalo de pode ser obtido pela equação II.5 [16], onde  $\chi^2_{(n-1,p)}$  é a distribuição *Qui-Quadrado* com  $n - 1$  graus de liberdade e  $e'$  é a amplitude do intervalo de confiança dada pela amostra. Neste caso, incrementa-se o tamanho da amostra até que  $e' \leq e$ , ou seja, até que o erro calculado seja menor ou igual ao exigido.

$$e' = \sqrt{\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi^2_{(n-1,1-\alpha/2)}}} - \sqrt{\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi^2_{(n-1,\alpha/2)}}} \quad (\text{II.5})$$

A rigor, em todos os casos, deve-se garantir que  $n$  é suficientemente grande para que a distribuição da média amostral seja aproximadamente normal, como garante o Teorema Central do Limite [16], por não se conhecer de antemão as distribuições das populações. Entretanto, trabalhando com apenas uma amostra isso não é possível, mas minimiza-se o erro na inferência adotando amostras iniciais grandes. A definição do quão grande devem ser as amostras iniciais foram aqui estimadas empiricamente.

Os parâmetros estimados para o congestionamento darão suporte a escolha da restrição de capacidade do TWA. Por sua vez, os parâmetros estimados para o tráfego retransmitido serão utilizados para definir um limite superior para essa métrica.

2) *Custo Físico*: A rede será projetada desde sua topologia física e a metodologia proposta visa obter uma alocação de recursos suficiente para atender aos requisitos impostos de forma econômica, mas sem sacrificar o desempenho da rede. Considera-se que os enlaces de fibra óptica são bidirecionais e que o custo de instalação físico apenas o custo de instalação da primeira fibra.

Outro fator a ser considerado é que a solução para a topologia física de uma rede não pode ser muito dependente da instância. Portanto é necessário um critério de qualidade para a topologia física que não considere o número de transceptores, pois estes definirão as instâncias. Propõe-se aqui garantir que as redes criadas não sejam mais onerosas, proporcionalmente, do que alguma rede real bem conhecida. Para estabelecer essa proporcionalidade deve-se obter uma razão adimensional que represente cada rede física, para então confrontá-las.

Isso pode ser feito tomando a razão entre a média do custo de ligações físicas existentes por nó ( $FE$ ) e a média

do custo de todas as ligações físicas possíveis ( $FP$ ). Sejam:  $N$  o número de nós da rede;  $C_{m,n}$  o custo associado a uma ligação física entre o par de nós  $(m,n)$ ; e  $D_{m,n} \in \{0,1\}$  representa existência (1) ou não (0) de uma ligação física entre o par  $(m,n)$ . Assim,  $FP = \sum_{mn} C_{mn} / (N^2 - N)$  e  $FE = (1/N) \cdot \sum_{mn} C_{mn} \cdot D_{mn}$ . Isto resulta na definição 1.

**Definição 1** (TIF). A Taxa de Instalação Física (TIF) é dada pela relação:

$$TIF = \frac{FE}{FP} = (N - 1) \cdot \frac{\sum_{mn} C_{mn} \cdot D_{mn}}{\sum_{mn} C_{mn}}$$

Inicialmente calcula-se a  $TIF$  para uma rede real que seria usada como referência. As redes a serem projetadas devem considerar este valor de referência para  $TIF$  como limitante superior. Ou ainda, pode-se embutir uma folga ( $TIFg$ ), exigindo que a rede projetada tenha  $TIF$  20% ou 30% abaixo da  $TIF$  de referência, por exemplo. Todavia, exigir um  $TIFg$  muito grande pode tornar a solução do problema inviável.

3) *Restrições do TWA*: Para garantir limitações superiores (UB) em variáveis de interesse, utilizamos as restrições para o número total de transceptores, a soma de todo o tráfego retransmitido na rede, além do custo de instalação da rede física e capacidade de transmissão de tráfego em enlaces lógicos [3].

### III. RESULTADOS

Foram realizados testes computacionais com uma rede de 30 nós. As matrizes de tráfego e distâncias, dados de entrada do problema, foram geradas de forma aleatória, com entradas uniformemente distribuídas. A matriz de tráfego possui valores entre 0 e 100. A matriz de distâncias, obedecendo à desigualdade triangular [17], teve o posicionamento dos pontos sorteado sobre o quadrante do plano cartesiano com ordenadas e abscissas também entre 0 e 100.

O computador onde foram executados os experimentos possui a seguinte configuração: *Intel Pentium®4 CPU 3.00GHz* de 2 núcleos, com 2048KB de *cache*, 1.5GB de RAM, executando o sistema operacional *Kubuntu 9.04*.

#### A. Composição das Sub-Redes

Na separação dos nós em sub-redes, definimos  $M_i = 3$ , o número e tamanho mínimo de *clusters*. O tamanho e número máximo de *clusters* na hierarquia foram definidos como:  $M_a = \lfloor N/M_i \rfloor = 30/3 = 10$ . O fator de calibração adotado foi  $C_a = 1740$ . O tamanho da população e o número de populações paralelas foram definidos como 100. A estagnação máxima adotada foi 500, ou seja, o genético é interrompido se ficar 500 gerações sem haver melhora.

O tempo de execução do genético foi de 30.76 minutos. A estagnação foi alcançada na geração 5473, tendo sido visitadas mais de 13.7 milhões de soluções. Destaca-se que a variação no valor da função de avaliação do genético foi superior a 50%, evidenciando a variabilidade das soluções possíveis e a relevância de um bom método para a escolha da estrutura hierárquica da rede.

A hierarquia escolhida para a rede de 30 nós é composta de 5 *clusters*, de tamanho variando entre 4 e 8 nós. No cálculo da média das distâncias o melhor indivíduo possui  $M = 24.4$ . O total de tráfego de acesso ao *backbone* foi  $T = 51579.5$ . Assim, considerando os pesos unitários e o fator de calibração  $C_a$ , o *fitness* do melhor indivíduo foi 94057.6. Para a distância a diferença entre a pior e a melhor solução visitada foi superior a 145%, enquanto para o tráfego de acesso essa diferença foi de aproximadamente 30%.

#### B. Estatísticas de Congestionamento e Tráfego Retransmitido

Para cada sub-rede, *clusters* e *backbone*, as instâncias a serem analisadas são definidas pelo grau lógico. Para uma sub-rede  $k$  de tamanho  $t_k$ , os graus lógicos considerados são 1, 2, ...,  $\lfloor t_k/2 \rfloor$ . Para cada instância foram estimados a média e o desvio padrão, ambos com confiança de 99% e margem de erro de 1%. A partir de testes preliminares, estimou-se que os parâmetros estatísticos a serem inferidos atingiam estabilidade a partir de  $10^3$  soluções viáveis por amostra, para os valores de confiança e erro adotados. Portanto, esse valor foi utilizado como tamanho mínimo para as amostras.

No decorrer do texto, quando se fizer referência às sub-redes em estudo, a codificação que está apresentada na tabela I será adotada para identificação do *backbone* e dos *clusters*. A tabela II apresenta as legendas para as tabelas III, IV e V, que serão utilizadas na apresentação das estatísticas de congestionamento e tráfego retransmitido nas sub-redes.

Sub-rede	Tamanho	Identificação (ID)
Backbone	5	bk.t5
Cluster 1	5	cl1.t5
Cluster 2	6	cl2.t6
Cluster 3	7	cl3.t7
Cluster 4	8	cl4.t8
Cluster 5	4	cl5.t4

Tabela I  
IDENTIFICAÇÃO DAS SUB-REDES.

GL	=	Grau lógico
ID	=	Identificação da sub-rede
LB	=	Lower bound
HLDA	=	Heurística HLDA
Min	=	Mínimo amostral
Max	=	Máximo amostral
MED	=	Média amostral
DP	=	Desvio padrão amostral
t(s)	=	Tempo de execução em segundos
CG.Ds	=	Desvios padrão para o UB de congestionamento
CG.UB	=	Upper bound para congestionamento
TR.Ds	=	Desvios padrão para o UB de tráfego retransmitido
TR.UB	=	Upper bound para tráfego retransmitido

Tabela II  
LEGENDA PARA AS TABELAS III, IV E V.

Nas tabelas III e IV, as porcentagens apresentadas são margens percentuais da solução obtida sobre o LB. Como *lower bound* para o congestionamento foi utilizado o MTB

(*Minimum Traffic Bound*), enquanto para o tráfego retransmitido utilizou-se o FTB (*Forwarded Traffic Bound*). Ambos os métodos para cálculo de *lower bounds*, foram apresentados em [3]. Nestas mesmas tabelas, para efeito de comparação, a coluna HLDA apresenta respectivamente os resultados de congestionamento e tráfego retransmitido obtidos utilizando a conhecida heurística HLDA [12].

Gl	ID	LB	HLDA	Min	Max	MED	DP	t(s)
1	c5.t4	4196	3%	3%	4%	3%	0.3%	1
1	bk.t5	8897	98%	97%	110%	100%	3.1%	3
1	c1.t5	5563	7%	5%	8%	7%	0.8%	3
1	c2.t6	5928	17%	10%	18%	13%	2.6%	8
1	c3.t7	7264	10%	7%	14%	10%	1.4%	19
1	c4.t8	8150	13%	10%	17%	13%	1.4%	42
2	c5.t4	2098	0%	0%	110%	35%	46%	33
2	bk.t5	4448	59%	21%	230%	71%	52%	89
2	c1.t5	2782	4%	0%	110%	16%	35%	38
2	c2.t6	2964	0%	0%	120%	13%	31%	67
2	c3.t7	3632	100%	0%	120%	9%	25%	86
2	c4.t8	4075	0%	0%	120%	8%	24%	186
3	c2.t6	1976	16%	0%	220%	24%	46%	148
3	c3.t7	2421	200%	0%	210%	14%	35%	174
3	c4.t8	2717	0%	0%	210%	13%	34%	416
4	c4.t8	2037	0%	0%	320%	18%	34%	404

Tabela III  
RESULTADO DAS ESTATÍSTICAS PARA O CONGESTIONAMENTO.

Gl	ID	LB	HLDA	Min	Max	MED	DP	t(s)
1	c5.t4	4500	92%	92%	94%	93%	1.1%	1
1	bk.t5	44000	16%	15%	22%	18%	2.3%	3
1	c1.t5	8500	100%	95%	110%	100%	4.2%	3
1	c2.t6	13000	110%	88%	110%	99%	5.6%	8
1	c3.t7	19000	95%	82%	100%	94%	5.7%	19
1	c4.t8	27000	100%	90%	110%	100%	4.1%	42
2	c5.t4	1400	100%	89%	290%	140%	66%	69
2	bk.t5	14000	58%	17%	100%	37%	21%	15
2	c1.t5	2700	170%	93%	330%	140%	57%	100
2	c2.t6	3900	120%	81%	320%	150%	45%	140
2	c3.t7	5300	270%	82%	350%	160%	40%	230
2	c4.t8	7700	150%	91%	370%	150%	35%	400
3	c2.t6	2400	150%	86%	460%	150%	56%	230
3	c3.t7	3700	360%	84%	410%	130%	40%	240
3	c4.t8	5000	98%	91%	400%	140%	36%	460
4	c4.t8	3500	110%	97%	530%	140%	38%	510

Tabela IV  
RESULTADO DAS ESTATÍSTICAS PARA O TRÁFEGO RETRANSMITIDO.

Os UB para o congestionamento e o tráfego retransmitido, considerados na solução do TWA, foram calculados como a média menos uma quantidade de desvios padrão, obtidos por inferência estatística. Para as duas métricas essa quantidade de desvios padrão é múltipla de 0.5 e foram definidas como a maior possível, desde que o UB resultante não ultrapasse o respectivo mínimo amostral. A tabela V mostra os valores resultantes desta regra.

Calculamos a *TIF* para a rede NFSNET [8]. O valor calculado foi  $TIF_{NFSNET} = 1.82$ , e este será o valor de referência sobre o qual ainda exigimos uma folga para baixo (*TIFg*), para dessa forma definir o UB para o custo físico de cada sub-rede.

ID	GL	CG.Ds	CG.UB	TR.Ds	TR.UB
bk.t5	1	1.0	17636	1.0	51437
bk.t5	2	0.5	6434	0.5	18088
c1.t5	1	1.0	5883	1.0	16835
c1.t5	2	0.0	3224	0.5	5774
c2.t6	1	1.0	6558	1.5	24601
c2.t6	2	0.0	3359	1.5	7092
c2.t6	3	0.5	2002	1.0	4569
c3.t7	1	1.5	7836	1.5	35938
c3.t7	2	0.0	3950	2.0	9625
c3.t7	3	0.0	2768	1.0	6872
c4.t8	1	2.0	8984	2.5	51115
c4.t8	2	0.0	4379	1.5	15137
c4.t8	3	0.0	3071	1.0	9981
c4.t8	4	0.5	2056	1.0	7194
c5.t4	1	1.5	4306	1.0	8555
c5.t4	2	0.5	2353	0.5	2991

Tabela V  
UB CALCULADOS PARA CONGESTIONAMENTO E TRÁFEGO RETRANSMITIDO.

### C. Resolução das Sub-redes com TWA

Com relação à limitação do custo físico, iniciamos com um *TIFg* de 40% pois em testes preliminares este se mostrou suficiente para garantir a viabilidade das soluções. Reduzimos o *TIFg* nas situações em que não foi possível encontrar solução viável. Além disso, aumentamos o *TIFg* enquanto ainda fossem encontradas soluções, visando obter o melhor custo físico possível que ainda atendesse às demais exigências.

Para cada *TIFg*, a estratégia adotada foi, partindo do menor grau lógico ( $Gl = 1$ ), fixar nos valores mínimos o número de comprimentos de onda, e executar o modelo básico do TWA com as adições indicadas na seção II-B3. Um resolvidor linear para problemas MILP é instanciado com essa configuração. Enquanto o resolvidor linear retornar que o problema é insolúvel, o número de comprimentos de onda ( $W$ ) será incrementado.

Se não for encontrada uma solução viável dentro de  $10^4$  segundos, o processo é abortado e é aplicado o mesmo procedimento de quando a solução é insolúvel. Isso é feito com o objetivo de relaxar as restrições de modo que o resolvidor linear possa encontrar uma solução viável mais rapidamente, sacrificando um pouco a sua qualidade.

Essas situações em que o modelo precisou ser calibrado, que chamaremos de *Instância Insolúvel (I)*, fazem parte do método e são registradas conjuntamente com os resultados. Um método de uso similar para o modelo TWA foi apresentado anteriormente em [2].

Se uma solução viável é encontrada, o processo de otimização do resolvidor linear é interrompido, a solução é registrada e o grau lógico é incrementado, dando continuidade ao processo. Vale lembrar que o processo de otimização é interrompido pois todos os parâmetros de interesse já estão limitados satisfatoriamente, portanto qualquer solução viável já atende o que foi exigido.

Utilizamos o resolvidor liner SCIP (*Solving Constraint Integer Programs* - [scip.zib.de](http://scip.zib.de)) para encontrar as soluções viáveis para as diversas instâncias do TWA.

A tabela VI apresenta legendas adicionais para a tabela VII, que será utilizada na apresentação dos resultados obtidos para o projeto completo das sub-redes utilizando o modelo TWA.

W	=	Número de comprimentos de onda
TIFg	=	Folga em relação à TIF da NFSNET
TT	=	Total de transceptores
CF	=	Custo físico
TIF	=	TIF resultante
CG	=	Congestionamento
TR	=	Tráfego retransmitido

Tabela VI  
LEGENDA PARA A TABELA VII.

ID	GI	W	TIFg	TT	CF	TIF	TR	CG	t(s)
bk.t5	1	1	70%	5	51	0.54	51084	17526	0.1
bk.t5	2	2	70%	10	51	0.54	17667	6434	0.4
c1.t5	1	1	20%	5	79	1.42	16635	5882	1
c1.t5	2	2	20%	9	79	1.42	5755	3003	11
c2.t6	1	2	40%	6	68	1.07	24484	6523	98
c2.t6	2	3	40%	12	68	1.07	5556	2730	9
c2.t6	3	4	40%	16	68	1.07	4267	2002	74
c3.t7	1	1	30%	7	85	1.24	35709	7821	37
c3.t7	2	3	30%	13	87	1.26	7755	2961	215
c3.t7	3	3	30%	18	84	1.23	6824	2768	2859
c4.t8	1	1	40%	8	80	1.09	50807	8982	698
c4.t8	2	2	40%	16	79	1.06	7976	3582	17
c4.t8	3	2	40%	16	79	1.07	7069	3050	58
c4.t8	4	3	40%	22	77	1.04	6590	2056	587
c5.t4	1	1	20%	4	65	1.36	8546	4304	0.4
c5.t4	2	2	20%	7	65	1.36	233	1515	0.1

Tabela VII  
RESUMO DOS RESULTADOS COM TWA.

No modelo TWA o grau lógico é representado como uma restrição no número total de transceptores na rede. Como pode-se notar na coluna *TT*, além do grau lógico 1 onde é óbvio que o número de transceptores deve ser igual ao número de nós, somente para o grau lógico 2, em algumas sub-redes, foi necessário utilizar todos os transceptores permitidos.

Para duas instâncias, *c1.t5* e *c3.t7*, ambas com grau lógico 1, mesmo com um *TIFg* reduzido a 0.0% não foi possível encontrar solução viável. Neste caso, os UB para congestionamento e tráfego retransmitido foram relaxados, reduzindo em 0.5 o número de desvios padrão abaixo da média para ambos, nas duas instâncias.

A última coluna da tabela VII, mostra o tempos de execução da última iteração da instância, aquela que retornou uma solução viável. Nota-se que, na maioria dos casos, esse tempo foi de apenas alguns segundos. Como o modelo TWA foi utilizado de forma iterativa, variando os parâmetros de qualidade para as restrições, para cada instância foi contabilizado o tempo total de busca, considerando todas as tentativas de resolução devido às variações em *W* e *TIFg*. Além disso, para os casos de exceção citados acima, onde foi necessário relaxar os UB, também foi contabilizado o tempo das tentativas com os valores originais de desvios padrão abaixo da média. No total, foram gastas 121 horas de execução do modelo TWA para todas as instâncias testadas durante o processo de busca.

## IV. CONCLUSÃO

Foi apresentado um procedimento para a resolução de WRON com topologias hierárquicas em malha, fazendo uso de um algoritmo genético e da eficiência do modelo TWA, além da estimação de parâmetros de qualidade para as principais métricas que envolvem o projeto da rede.

Com relação ao custo físico da rede, foi definido como parâmetro de qualidade a TIF, que permite a comparação dos resultados obtidos com redes conhecidas na literatura. A TIF das sub-redes mostra que o processo de busca iniciado com o genético, onde os nós foram agrupados por proximidade, gerou uma solução final de boa qualidade, visto que foi possível utilizar fatores de qualidade (*TIFg*) em todos os casos. Os experimentos mostraram que o custo físico não possui relação evidente com o grau lógico pois, para cada sub-rede, o valor de *TIFg* para o qual foi possível obter soluções viáveis foi o mesmo, independente do grau lógico.

Possíveis aplicações para trabalhos futuros seriam o projeto de redes com topologia em malha genéricas e as variações permitidas para o modelo TWA [3], considerando diferentes restrições e funções objetivo.

## REFERÊNCIAS

- [1] MUKHERJEE, B. *Optical Communication Networks*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1997.
- [2] LIMA, F. O. et al. Um Modelo Eficiente para o Projeto Completo de Redes Ópticas. *XLI SBPO - XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Porto Seguro, BA, 2009.
- [3] LIMA, F. de O. *Um modelo eficiente para o projeto completo de redes ópticas*. Dissertação (Mestrado) — PPGE - Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo, 2010. Disponível em: <<http://code.google.com/p/twa/>>.
- [4] JAUMARD, B.; MEYER, C.; THIONGANE, B. Comparison of ILP Formulations for the RWA Problem. *Les Cahiers du GERAD - G-2004-66*, 2004.
- [5] SHI, J.; FONSEKA, J. P. Hierarchical Self-Healing Rings. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 3, No. 6, 1995.
- [6] SEGATTO, M. E. V. et al. Hybrid approaches for the design of mesh and hierarchical ring optical networks. *Proceedings of SPIE06 - Photonics Europe 2006*, 2006.
- [7] SILVA, M. et al. On Solving HSHR Networks. *6th Conference on Telecommunications - Conftele 2007*, 2007.
- [8] RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N. *Optical Networks: a practical perspective*. 2<sup>nd</sup>. ed. [S.l.]: Morgan Kaufmann Pub. Inc., San Francisco, 2002.
- [9] ALMEIDA, R. T. R. et al. Design of Virtual Topologies for Large Optical Networks Through an Efficient MILP Formulation. *Optical Switching and Networking*, v. 3, p. 2-10, 2006.
- [10] KRISHNASWAMY, R.; SIVARAJAN, K. Design of logical topologies: a linear formulation for wavelength-routed optical networks with no wavelength changers. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, v. 9, n. 2, p. 186-198, Apr 2001. ISSN 1063-6692.
- [11] LIU, H.; TOBAGI, F. A. Physical topology design for all-optical networks. *Optical Switching and Networks*, Elsevier, 2008.
- [12] RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N. Design of Logical Topologies for WavelengthRouted Optical Networks. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* vol. 14 pag. 840 851, 1996.
- [13] WALL, M. GAlib: A C++ Library of Genetic Alrorthim Components. MIT - <http://lancet.mit.edu/ga/>, 2000.
- [14] GOLDBERG. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. [S.l.]: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 2002.
- [15] FOURER, R.; GAY, D. M.; KERNIGHAN, B. W. A Modeling Language for Mathematical Programming. *Management Science* 36 pp. 519-54, 1990.
- [16] NETO, P. L. de O. C. *Estatística*. 2<sup>nd</sup>. ed. [S.l.]: Edgard Blücher, São Paulo, 2002.
- [17] CORMEN, H. *Algoritmos: teoria e prática*. [S.l.]: Elsevier, 2002.