

Projeto Completo de Redes Ópticas em Hierarquia

José da Silva

Laboratório de Telecomunicações

Univerdidade Federal do Espírito Santo Vitória/ES 29055-280

e-mail: momag2010@gmail.com

Maria dos Santos

Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado

EPUSP-USP

e-mail: momag2010@gmail.com

Resumo—This electronic document is a *áliveâ* template. The various components of your paper [title, text, heads, etc.] are already defined on the style sheet, as illustrated by the portions given in this document. (Abstract)

I. INTRODUÇÃO

O tipo de topologia para redes ópticas com roteamento por comprimento de onda mais estudado na literatura é a topologia em malha. No entanto, existem trabalhos que exploram redes com arquitetura em hierarquia, mais precisamente anéis em hierarquia [?], [?], [?]. Contudo, até onde possuímos conhecimento, a junção destes dois tipos de arquiteturas ainda não foi explorado no contexto de WRONs. Neste trabalho, decidiu-se por estudar uma arquitetura de malhas em hierarquia, onde existe uma sub-rede na hierarquia superior que será chamada de *backbone*, cujos ~~seus~~ nós pertencem cada um a uma ~~outra~~ sub-rede de hierarquia inferior. Cada sub-rede inferior é chamada de *cluster*.

O objetivo principal deste trabalho é criar uma metodologia que viabilize o projeto completo de malhas hierárquicas, ~~aproveitando o potencial da modelagem TWA, juntamente com métodos heurísticos.~~ Tomando como requisitos apenas um conjunto de nós de rede, com sua disposição geográfica e requisições de tráfego esperadas. O projeto completo abrange aqui, além das variáveis de decisão suportadas pelo modelo TWA, a escolha da estrutura hierárquica da rede.

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 cruza de um nível hierárquico para outro, chamado de tráfego de acesso. Este tráfego pode ser acumulado nos nós de acesso ao *backbone* ~~(como será mostrado na Seção II-A)~~, 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 [?], [?]. Dessas considerações, temos que cada sub-rede pode ser projetada separadamente, ~~eliminando a necessidade de uma modelagem para toda a hierarquia.~~

~~Tendo sido determinada a estrutura hierárquica, cada sub-rede é modelada com o TWA. Nesta fase, a 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. 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.


Para estabelecer parâmetros de qualidade para congestionamento e tráfego retransmitido, são estimados estatisticamente as médias e desvios padrões de suas populações de soluções viáveis para o VTD, em cada sub-rede. Nessas inferências é garantida a representatividade das amostras obtidas, ~~como será mostrado na seção II-B1.~~

Para o número de comprimentos de onda, ~~foi utilizada uma estratégia adotada anteriormente em [?].~~ Tentamos obter soluções com um comprimento de onda apenas e vamos incrementando esse número enquanto não for possível encontrar soluções viáveis. Essa técnica deriva de uma característica do TWA, pois o número de variáveis no modelo é múltiplo do número de comprimentos de onda adotado.

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 [?]. Estamos considerando como custo de instalação apenas a distância entre os nós da rede, que representa o comprimento dos enlaces de fibra instaladas entre os mesmos. O dimensionamento dos nós poderá ser feito com base no projeto obtido desta metodologia, que deverá demandar o mínimo possível de recursos da rede.

No projeto de topologias lógicas, o número de transceptores da rede normalmente define as instâncias do problema [?], pois está relacionado com o dimensionamento dos nós da rede. Essa abordagem também foi utilizada aqui, todavia, na literatura é comum definir o número exato de transceptores que cada instância possui [?]. Neste trabalho, nós apenas limitamos o número de transceptores, permitindo que o modelo encontre soluções mais econômicas para este parâmetro.

II. PROJETO DE REDES EM HIERARQUIA

~~As próximas seções são dedicadas a explicação detalhada dos principais aspectos que compõem as etapas da metodologia proposta.~~ Existem três etapas, onde os resultados de cada uma são fornecidos para as seguintes. 

Na primeira etapa, são fornecidas as matrizes de demandas de tráfego e distâncias, únicos dados de entrada do projeto.

Um algoritmo genético faz a separação dos nós em sub-redes. Sua função objetivo minimiza o tráfego transferido entre as sub-redes e a distância entre os nós, ou seja, procura-se concentrar o tráfego no interior das sub-redes, e formá-las com nós geograficamente próximos. ~~Um resultado secundário dessa fase são as matrizes de distância e tráfego para cada sub-rede.~~

Na fase intermediária, são estimadas a média e o desvio padrão para congestionamento e tráfego retransmitido, para cada sub-rede, em graus lógicos variados. Neste ponto também são calculados *lower bounds* (LBs) e *upper bounds* (UBs) para estas métricas. Os LBs calculados foram introduzidos na dissertação de mestrado [?], e os UBs são calculados a partir da média e do desvio padrão. Por fim, também são calculados UBs para o custo de instalação físico de cada sub-rede.

A última etapa consiste na resolução do modelo TWA para as sub-redes, respeitando os *bounds* calculados e visando utilizar o menor número possível de comprimentos de onda. A saída desta última fase fornece a solução do projeto, representado pelas topologias física e virtual, roteamento e alocação dos comprimentos de onda, além da distribuição do tráfego. Esses resultados são referentes às sub-redes em separado, porém, quando são agrupados, representam o resultado global da rede em hierarquia.

A. Estrutura Hierárquica

A quantidade e o tamanho dos *clusters* é livre, sendo definido apenas um mesmo número M_i para o mínimo de *clusters* e o seu tamanho mínimo. ~~Deste modo, se a rede possui n nós, então o número máximo de *clusters* e seu tamanho máximo (M_a) será igual a $\lfloor n/M_i \rfloor$.~~ Para a escolha da estrutura hierárquica da rede foi implementado um algoritmo genético com a biblioteca *Galib*. O algoritmo adotado foi o *GADemeGA*, que mantém populações paralelas, com probabilidade de migração a cada geração da evolução. Os parâmetros de configuração das funções da *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 objetivo, que atribuirá uma métrica de qualidade para os cromossomos.

Dois parâmetros importantes no projeto de uma rede são os custos de instalação e operação da mesma [?], [?], [?]. Na separação dos conjuntos de nós que formarão as sub-redes um fator que influencia fortemente no custo de instalação é a distância entre os nós. Se as sub-redes forem agrupados de modo que nós próximos façam parte do mesmo conjunto, haverá uma tendência de menor custo de instalação dos enlaces. Por esse motivo, a distância média entre os nós é uma boa métrica para minimizar o custo de instalação físico.

Não obstante, se dois nós que possuem grande quantidade de demanda de tráfego entre eles estiverem no mesmo *cluster*, eles deixarão de rotear pelo *backbone* esse forte fluxo. Definimos tráfego de acesso como sendo todo aquele que cruza as hierarquias da rede, em ambos os sentidos, ou seja, se origina em uma sub-rede com destino a outra. Destaca-se que para efeito de resultados do projeto, 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 soma da distância média entre os nós da hierarquia (M) 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 na seção anterior.

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 demanda acumulam nos nós de acesso todo tráfego que deverá entrar no *cluster* e sair dele.

Nos experimentos que serão apresentados no próximo capítulo, as entradas das matrizes de demanda de tráfego e 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 neste caso 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 teste piloto 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 objetivo do genético (*fitness*), faz uso de um fator de calibragem (C_a) a fim de tornar M e T compatíveis em termos de ordem de grandeza.

B. Qualidade do Projeto das Sub-Redes

Na seção II-B1 será explicado o processo de estimação das estatísticas para congestionamento e tráfego retransmitido. O critério de limitação do custo de instalação está descrito na seção II-B2. Por fim, para que as limitações das métricas possam ser repassadas ao modelo TWA serão necessárias restrições adicionais, sendo estas apresentadas na seção II-B3.

1) *Congestionamento e Tráfego Retransmitido*: Para cada grau lógico geramos aleatoriamente uma amostra de soluções para a topologia lógica da rede. Modelos de programação linear foram implementados em *AMPL* [?] para distribuir o tráfego da rede sobre cada topologia lógica, através do solver *GLPK* (*GNU Linear Programming Kit* - gnu.org/software/glpk). Obtendo, para cada topologia lógica gerada, a distribuição de tráfego ótima para o congestionamento da rede e também para o total do tráfego retransmitido [?].

Dessas amostras estimamos a média e o desvio padrão das populações para o congestionamento e para o tráfego retransmitido, garantindo a representatividade de cada amostra.

Para determinar o tamanho necessário de cada amostra, de modo que estas sejam representativas para cada parâmetro estatístico estimado, utilizamos o método iterativo apontado por [?, Seção 4.5]. Para a média, o intervalo de confiança pode ser obtido por [?, Seção 4.4.1]:

$$e = Z_{(\alpha/2)} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Onde e é a margem de erro, a amplitude de intervalo de confiança, Z_p é a distribuição normal reduzida, α é o nível de confiança exigido, σ é o desvio padrão populacional e n é o tamanho da amostra. Mas ao invés de estimar o intervalo de confiança, desejamos, a partir de uma margem de erro dada, estimar o tamanho de amostra necessária. Resolvendo a equação acima para n , temos:

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

Onde n agora é a estimativa para o tamanho da amostra. Embora não conheçamos o desvio padrão populacional σ , a relação a seguir permite a substituição pela sua estimativa amostral s [?, Seção 3.4.5]:

$$t_{(n-1,p)} \cdot s = Z_p \cdot \sigma$$

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 σ . Assim, ficamos então com:

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

Onde n' é o tamanho da amostra utilizada para calcular s . Agora, se $n \leq n'$, a amostra já terá sido suficiente para a estimação da média. Caso contrário, mais elementos devem ser retirados aleatoriamente da população e adicionados à amostra, até que esta forneça uma estimativa $n \leq n'$.

Procedemos de forma análoga para estimar o tamanho de amostra representativa para a estimativa do desvio padrão, cujo intervalo de pode ser obtido por [?, Seção 4.4.4]:

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

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, vamos incrementando o tamanho da amostra até que $e' \leq e$, ou seja, até que o erro calculado seja menor ou igual ao exigido.

A rigor, em todos os casos, devíamos garantir que n é suficientemente grande para que a distribuição da média amostral seja aproximadamente normal, como garante o Teorema Central do Limite [?]. Pois não conhecemos de antemão as distribuições das populações. Entretanto, trabalhando com apenas uma amostra isso não é possível, mas podemos minimizar essa falta adotando amostras iniciais grandes. E a definição do quão grande devem ser as amostras iniciais pode ser estimada por testes piloto.

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

2) *Custo Físico*: Neste trabalho, projetamos a rede desde sua topologia física. Nossa metodologia visa obter uma alocação de recursos suficiente para atender aos requisitos impostos da forma mais econômica possível, mas sem sacrificar o desempenho da rede. Mas, pela própria estrutura do modelo TWA, decisões de menor complexidade são deixadas de fora, pois podem ser resolvidas em outras fases do projeto [?]. Por exemplo, não consideramos aqui o dimensionamento dos nós da rede. Pois a estratégia é que uma boa solução nesta fase do projeto facilite as fases posteriores.

Considerando que os enlaces de fibra óptica são bidirecionais, estamos considerando aqui como custo de instalação físico apenas o custo de instalação da primeira fibra (referência). ~~Apoiados no fato de que os cabos atuais comumente possuem vários pares de fibra. Portanto, utilizar mais de uma fibra no mesmo enlace é mais uma questão de dimensionamento dos nós do que do enlace em si.~~

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. ~~Como critério de qualidade, propomos aqui garantir que as redes criadas não sejam mais onerosas, proporcionalmente, do que alguma rede real bem conhecida.~~

Para estabelecer essa proporcionalidade, devemos obter uma razão adimensional que represente cada rede física, para então confrontá-las.

Isso pode ser feito tomando a razão entre a média por nó do custo de ligações físicas existentes ($FE = (1/N) \cdot \sum_{mn} C_{mn} \cdot D_{mn}$) e a média do custo de todas as ligações físicas possíveis ($FP = \sum_{mn} C_{mn} / (N^2 - N)$). O que resulta na definição 1.

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

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

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

Para garantir a proporcionalidade, inicialmente calculamos a TIF para uma rede real que seria usada como referência. E as redes a serem projetadas usariam essa TIF de referência como limitante superior. Ou ainda, pode-se embutir um **TIFgap**, exigindo que a rede projetada tenha TIF 20% ou 30% abaixo da TIF de referência, por exemplo. Todavia, exigir um **TIFgap** muito grande pode acarretar em inviabilidade.

3) **Restrições Adicionadas ao TWA**: Para incluir limitações superiores (*Upper Bounds*) em variáveis de interesse, definimos ~~a seguir~~ restrições que devem ser adicionadas ao modelo TWA ~~da Seção ??~~.

Dados 1: Upper bounds:

- 1) ~~TT = Número total de transceptores na rede.~~
- 2) ~~TR = Total tráfego retransmitido.~~
- 3) ~~TIF = Taxa de Instalação Física.~~

$$\sum_{mn} B_{mn}^{tr} \leq TT \quad (H.1)$$

$$\sum_{i \neq j} F_{ij} \cdot q_{ij}^{tr} \cdot A_o \leq TR, \text{ com } i \neq o. \quad (H.2)$$

$$\sum_{mn} C_{mn} \cdot D_{mn} \leq TIF \cdot \sum_{mn} C_{mn} / (N - 1), \text{ com } m < n. \quad (H.3)$$

A equação II.1 limita superiormente o número total de transceptores na rede, através da soma de todas as componentes topológicas cujo nó de início (n) é o nó de origem das ligações lógicas. Dessa forma, não há exigência quanto a uniformidade do grau lógico na rede, e podemos obter soluções que demandem de uma quantidade menor de transceptores.

Por sua vez, a equação II.2 limita superiormente a soma de todo o tráfego retransmitido na rede, pela soma de todas as componentes de tráfego cujo nó de origem das ligações lógicas (i) é diferente da fonte de tráfego s . Esse *upper bound* para o tráfego retransmitido nos permite garantir uma qualidade mínima para a retransmissão do tráfego na rede.

Na restrição II.3, que limita superiormente o custo de instalação da rede física, entra em cena a TIF que será imposta às instâncias da rede.

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 a desigualdade triangular [?], 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 calibragem 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 definida foi alcançada na geração 5473, tendo o genético visitado mais de 13.7 milhões de soluções. Destaca-se que a variação no valor da função objetivo 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 calibragem 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 menor que 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 piloto, estimou-se que as estatísticas atingiam estabilidade a partir de 10^3 amostras, para a confiança e o erro adotados. Portanto, esse valor foi utilizado como tamanho mínimo para as amostras.

No decorrer deste capítulo, 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 ??, que serão utilizadas na apresentação dos resultados obtidos para as estatísticas de congestionamento e tráfego retransmitido nas sub-redes. Cada linha dessas tabelas representa uma instância do processo de estimação, sendo definida por uma sub-rede e um grau lógico.

Nas tabelas III e IV, a coluna LB representa um *lower bound* para congestionamento e tráfego retransmitido, respectivamente. As quatro colunas que a seguem, são apresentadas

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

Tabela II
LEGENDA PARA AS TABELAS III E IV.

em valores percentuais relativamente ao *lower bound*, mais especificamente, quantos por cento acima do mesmo. 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 [?]. 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 [?].

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	cl1.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%	46.0%	33
2	bk.t5	4448	59%	21%	230%	71%	52.0%	89
2	cl1.t5	2782	4%	0%	110%	16%	35.0%	38
2	c2.t6	2964	0%	0%	120%	13%	31.0%	67
2	c3.t7	3632	100%	0%	120%	9%	25.0%	86
2	c4.t8	4075	0%	0%	120%	8%	24.0%	186
3	c2.t6	1976	16%	0%	220%	24%	46.0%	148
3	c3.t7	2421	200%	0%	210%	14%	35.0%	174
3	c4.t8	2717	0%	0%	210%	13%	34.0%	416
4	c4.t8	2037	0%	0%	320%	18%	34.0%	404

Tabela III
RESULTADO DAS ESTATÍSTICAS PARA O CONGESTIONAMENTO.

~~Para o caso de grau lógico 1, rede em anel, destaca-se a pequena diferença entre máximo e mínimo. A pouca variabilidade desse tipo de topologia é reforçada pelo pequeno desvio padrão observado nestas instâncias.~~

Os *upper bounds* foram calculados como a média menos uma quantidade de desvios padrão, tanto para o congestio-

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	cl1.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%	66.0%	69
2	bk.t5	14000	58%	17%	100%	37%	21.0%	15
2	cl1.t5	2700	170%	93%	330%	140%	57.0%	100
2	c2.t6	3900	120%	81%	320%	150%	45.0%	140
2	c3.t7	5300	270%	82%	350%	160%	40.0%	230
2	c4.t8	7700	150%	91%	370%	150%	35.0%	400
3	c2.t6	2400	150%	86%	460%	150%	56.0%	230
3	c3.t7	3700	360%	84%	410%	130%	40.0%	240
3	c4.t8	5000	98%	91%	400%	140%	36.0%	460
4	c4.t8	3500	110%	97%	530%	140%	38.0%	510

Tabela IV
RESULTADO DAS ESTATÍSTICAS PARA O TRÁFEGO RETRANSMITIDO.

namento quanto para o tráfego retransmitido. Para as duas métricas essa quantidade de desvios padrão é múltipla de 1/2 e foram definidas como a maior possível, desde que o *upper bound* resultante não ultrapasse o respectivo mínimo amostral.

Calculamos a *TIF* para a rede NFSNET [?]. O valor calculado foi $TIF_{NFSNET} = 1.82$, e este será o valor de referência sobre o qual ainda exigimos uma folga para baixo (*TIFgap*), para dessa forma definir o *upper bound* para o custo físico (*UBCFis*) de cada sub-rede. ~~Conforme será detalhado na próxima seção, o *TIFgap* utilizado variou entre 70% e 20%.~~

C. Resolução das Sub-redes com TWA

Todas as estatísticas de congestionamento e tráfego retransmitido foram calculadas utilizando como instâncias as combinações de sub-rede e grau lógico. ~~Destaca-se que as restrições do modelo TWA utilizadas para controle de grau lógico, na prática não limitam o grau lógico de cada nó da forma tradicional [?], efetivamente o que é limitado é o total de transceptores utilizados na topologia virtual, conforme a restrição H.1.~~

Os valores de *upper bounds* utilizados para tráfego retransmitido e congestionamento são os apresentados na tabela ???. Com relação à limitação do custo físico, iniciamos com um *TIFgap* de 40% pois em testes piloto este se mostrou promissor. Reduzimos o *TIFgap* nas situações em que não foi possível encontrar solução viável. Além disso, aumentamos o *TIFgap* enquanto ainda fossem encontradas soluções, visando obter o melhor custo físico possível que ainda atendesse às demais exigências.

Para cada *TIFgap*, 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 *solver* para problemas MILP é instanciado com essa configuração. Enquanto o *solver* retornar que o problema é insolúvel [?], o número de comprimentos de onda (W) será incrementado.

Se o *solver* não encontrar uma solução viável dentro de

10^4 segundos, então ele é abortado e é aplicado o mesmo procedimento de quando a solução é insolúvel. Isso é feito com o objetivo de folgar as restrições de modo que o *solver* possa encontrar uma solução viável mais rapidamente, sacrificando um pouco a qualidade das restrições. 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 [?].

Se uma solução viável é encontrada, o *solver* é interrompido, a solução é registrada e o grau lógico é incrementado, dando continuidade ao processo. Vale lembrar que o *solver* é interrompido pois todos os parâmetros de interesse já estão limitados satisfatoriamente, portanto qualquer solução viável já atende o que foi exigido. Não sendo necessário perseguir otimalidade neste ponto.

Utilizamos o *solver* SCIP (*Solving Constraint Integer Programs* - scip.zib.de) para encontrar as soluções viáveis para as diversas instâncias do TWA.

A tabela V apresenta as legendas para a tabela VI, que será utilizada na apresentação dos resultados obtidos para o projeto completo das sub-redes utilizando o modelo TWA. Nesta tabela, cada linha representa uma instância, composta por uma sub-rede e um grau lógico.

ID	=	Identificação da sub-rede
Gl	=	Grau lógico
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
Ti(s)	=	Tempo de execução da instância
Tt(s)	=	Tempo de execução total

Tabela V
LEGENDA PARA A TABELA VI.

ID	Gl	W	TIFg	TT	CF	TIF	TR	CG	Ti	Tt
bk.t5	1	1	70%	5	51	0.54	51084	17526	0.1	5
bk.t5	2	2	70%	10	51	0.54	17667	6434	0.4	15
c1.t5	1	1	20%	5	79	1.42	16635	5882	1	81842
c1.t5	2	2	20%	9	79	1.42	5755	3003	11	95
c2.t6	1	2	40%	6	68	1.07	24484	6523	98	831
c2.t6	2	3	40%	12	68	1.07	5556	2730	9	225
c2.t6	3	4	40%	16	68	1.07	4267	2002	74	509
c3.t7	1	1	30%	7	85	1.24	35709	7821	37	221110
c3.t7	2	3	30%	13	87	1.26	7755	2961	215	24271
c3.t7	3	3	30%	18	84	1.23	6824	2768	2859	17586
c4.t8	1	1	40%	8	80	1.09	50807	8982	698	41074
c4.t8	2	2	40%	16	79	1.06	7976	3582	17	21350
c4.t8	3	2	40%	16	79	1.07	7069	3050	58	3999
c4.t8	4	3	40%	22	77	1.04	6590	2056	587	23027
c5.t4	1	1	20%	4	65	1.36	8546	4304	0.4	9
c5.t4	2	2	20%	7	65	1.36	233	1515	0.1	6

Tabela VI
RESUMO DOS RESULTADOS COM TWA.

Os resultados obtidos para 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 (*TIFgap*) em todos os casos.

Os experimentos mostraram que o custo físico não possui relação evidente com o grau lógico. Isso fica claro pois para cada sub-rede o valor de *TIFgap* para o qual foi possível obter soluções viáveis foi o mesmo, independente do grau lógico.

No modelo TWA o grau lógico é representado como uma restrição no número total de transceptores na rede. Como pode-se notar na coluna *TTranc*, 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 *TIFgap* reduzido a 0.0% não foi possível encontrar solução viável. Então relaxamos os *upper bounds* para congestionamento e tráfego retransmitido, reduzindo em 1/2 o número de desvios padrão abaixo da média para ambos, nas duas instâncias. Os valores mostrados na tabela ?? foram apresentados com essas exceções.

~~As últimas colunas da tabela VI, mostram os tempos de execução do processo de busca. Como o modelo TWA foi utilizado de forma iterativa, conforme descrito no pseudo código ??, variando os parâmetros de limitação ou qualidade para as restrições, são apresentados dois tempos para cada instância. A coluna *Tt*(s) mostra o tempo total, que contempla todas as tentativas de utilização do *solver*, devido às alterações em *W* e *TIFgap*. Além disso, para os casos de exceção citados acima, onde foi necessário folgar os *upper bounds* de tráfego e congestionamento, também foi contabilizado o tempo das tentativas com os valores originais de desvios padrão abaixo da média (*CongDs* e *TRetrDs*). A coluna *Ti*(s) mostra o tempo relativo apenas à última tentativa de resolução, ou seja, àquela que retornou uma solução viável. Como pode-se notar, na maioria dos casos esse último tempo foi de apenas alguns segundos.~~

IV. CONCLUSION

The conclusion goes here.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank...

REFERÊNCIAS

[1] H. Kopka and P. W. Daly, *A Guide to L^AT_EX*, 3rd ed. Harlow, England: Addison-Wesley, 1999.