

```
\documentclass[conference]{IEEEtran}
```

```
\usepackage[latin1]{inputenc}
```

```
%\usepackage{abnt-alf}
```

```
\usepackage[dvips]{graphicx}
```

```
\usepackage[brazil]{babel}
```

```
\usepackage{srcltx}
```

```
\input{prova.tex}
```

```
%
```

```
%\usepackage{cite}
```

```
\begin{document}
```

```
%
```

```
% paper title
```

```
%
```

```
\title{Projeto Completo de Redes Ópticas em Hierarquia}
```

```
%
```

```
% author names and affiliations
```

```
%
```

```
\author{\IEEEauthorblockN{$^{1}$Marcelo O. Lima, $^{1}$Fabio O. Lima,  
$^{1}$Marcelo E. V. Segatto, $^{1}$Elias S. Oliveira e $^{2}$Renato T. R. Almeida}  
\IEEEauthorblockA{Laboratório de Telecomunicações, $^{1}$Universidade  
Federal do Espírito Santo,  
$^{2}$Instituto Federal do Espírito Santo\\  
e-mail: marcelo.olima@gmail.com}  
}
```

```
%
```

```
% make the title area
```

```
%
```

```
\maketitle
```

%

\begin{abstract}

Este artigo apresenta uma metodologia ~~método~~ para o projeto físico e lógico de redes ópticas de comunicação com topologias em hierarquia~~hierárquicas~~. São resolvidos os problemas clássicos de projeto de topologia lógica e física e de roteamento e designação de comprimentos de onda, em função da localização geográfica dos nós da rede e do roteamento de demandas de tráfego entre os mesmos, definindo desde a sua configuração física até a escolha das rotas de tráfego e alocação de comprimentos de onda. Partindo das distâncias e demandas de tráfego entre os nós da rede, é utilizada A metodologia proposta consiste em uma abordagem híbrida em três etapas, que integram uma meta-heurística, procedimentos de inferência estatística e um modelo de programação linear inteira-mista, uma heurística em conjunto com otimização linear inteira-mista. O procedimento implementado consiste em três etapas, naNa primeira um algoritmo genético faz o agrupamento dos nós em sub-redes, definindo a estrutura hierárquica da solução para o projeto da rede óptica. ~~e~~Em seguida, um procedimento estatístico gera estimativas para parâmetros de interesse que serão fornecidos como exigência de qualidade para a solução do projeto, colocados como limitantes para variáveis do modelo de programação matemática, resolvido na última etapa. Por fim, esses parâmetros são empregados como limitadores para as restrições do modelo matemático utilizado na resolução das sub-redes. 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 em vista a abrangência do projeto, tendo como base de comparação limites inferiores teóricos para as métricas de otimização selecionadas e resultados de outras heurísticas e modelos de estudos de caso previamente publicados.

Palavras Chave: Projeto de rRedes ópticas, Otimização combinatória, Programação linear inteira-mista, Meta-heurísticaAlgoritmos genéticos.

\end{abstract}

\section{Introdução}

\label{intro}

O ~~interesse por~~ desenvolvimento de metodologias de projeto de redes ópticas de comunicações se intensificou após o ~~desenvolvimento~~ advento da tecnologia de multiplexação por comprimento de onda (WDM - {\it Wavelength Division Multiplexing}). Além de possibilitar a implementação de vários canais de comunicação na mesma fibra óptica~~transmissão de vários sinais pelo mesmo meio~~, em diferentes comprimentos de onda, esta tecnologia permite a implementação de redes com roteamento de tráfego por comprimentos de onda (WRON - {\it 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, separadamente ou em conjunto, na forma de métodos híbridos. Na literatura, o projeto completo de WRON é dividido em dois sub-problemas \cite{mukherjee}, que são denominados: VTD ({\it Virtual Topology Design}) e RWA ({\it Routing and Wavelength Assignment}). Esta divisão em sub-problemas é colocada como necessária para que se possa lidar com a extrema complexidade computacional dos problemas gerados por formulações de programação matemática que pretendam abordar o projeto completo de WRON. No entanto, em \cite{sbpo09, dissertFabio} foi apresentada uma modelagem para o projeto completo de WRON de ~~redes ópticas~~, denominada TWA ({\it 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~~alocação~~ de comprimentos de onda. Este modelo possui um reduzido número de variáveis e restrições, se comparado a modelos que resolvem apenas o RWA \cite{Jaumard04} e guarda semelhanças com modelos conhecidos \cite{ram02, Tornatore07}.

As metodologias de projeto O tipo de topologia para de WRON mais estudada ~~se~~ na

literatura consideram topologias em malha para as redes ópticas ~~é a topologia em malha~~. No entanto, existem trabalhos que exploram redes com topologias hierárquicas ~~arquitetura em hierarquia~~, mais precisamente as implementadas na forma de anéis em hierarquia hierárquicos \cite{fonseka, spie06, conftele07}. Contudo, até onde possuímos conhecimento, o projeto de topologias hierárquicas em malha ainda não foi explorado, sendo esta a principal contribuição deste trabalho. ~~a junção destes dois tipos de arquiteturas ainda não foi explorado. A metodologia de projeto de WRON proposta considera~~ Neste trabalho, ~~decidiu-se por estudar uma arquitetura de malhas em hierarquia, onde que~~ existe uma sub-rede na hierarquia superior que será chamada de \textit{backbone}, cujos nós pertencem cada um a uma sub-rede de hierarquia inferior, chamada \textit{cluster}.

O objetivo principal da metodologia proposta neste trabalho é este trabalho é criar uma metodologia que viabilize ~~viabilizar~~ o projeto completo de redes com topologias malhas hierárquicas em malha. ~~Considera-se como dados de projeto tomando como requisitos apenas um conjunto de nós de rede, com sua~~ a disposição geográfica dos nós da rede e as demandas ~~requisições~~ de tráfego esperadas entre os mesmos.

Uma simplificação adotada é que as ligações entre os \textit{clusters} e o \textit{backbone} serão opacas, ou seja, todos os componentes de uma ligação lógica transparente estão em um mesmo nível da hierarquia. Deste modo, o \textit{backbone} e os \textit{clusters} podem ser vistos como redes independentes, exceto pelo tráfego que passa ~~cruza~~ de um nível hierárquico para o outro, chamado de tráfego de acesso. Este tráfego pode ser acumulado nos nós de acesso ao \textit{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 \textit{cluster}, e escolher em cada um qual será o nó de acesso ao \textit{backbone}. Por sua vez, este último será formado pelo

conjunto de nós de acesso, também chamados de super-nós

\cite{spie06, conftele07}. ~~Dessas considerações~~ 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 das sub-rede 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 ~~A~~ estratégia adotada foi definir parâmetros de qualidade satisfatórios para as variáveis de interesse da formulação de programação linear inteira-mista utilizada (TWA), de modo que qualquer solução viável encontrada ~~pelo~~ modelo TWA 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 (\cite{ram02, Renato06, Sivarajan01, liu2008}).

\section{Projeto de Redes em Hierarquia}

\label{metodo}

A metodologia proposta consiste ~~em~~ de três etapas sequenciais, onde os resultados de cada uma são fornecidos para as seguintes. Na primeira, são fornecidos as como dados as matrizes de demandas de tráfego e de distâncias, ~~únicos dados de entrada do projeto~~. Um algoritmo genético faz a separação dos nós em sub-redes. ~~Sua função~~ objetivo buscando minimizar o tráfego transferido entre as sub-redes, bem como e a distância entre seus nós, ou seja, procura-se a evolução promovida pelo algoritmo genético concentrar o tráfego no interior das sub-redes, e as forma com formá-las 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 obtidos os limites superiores ($\textit{upper bounds}$ - UB) para o congestionamento e o tráfego retransmitido na rede, por meio de inferência estatística baseada na média e desvio padrão dos resultados das avaliações de amostras de soluções viáveis para o VTD. Estes limites superiores são valores máximos admissíveis para o congestionamento e o tráfego retransmitido, impostos às variáveis do modelo de programação inteira-mista 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 teóricos populações de soluções viáveis para o VTD, em cada sub-rede, em graus lógicos variados. Nessas inferências é garantida a

~~representatividade das amostras obtidas. Neste ponto também são calculados de suas para estabelecer parâmetros de qualidade para congestionamento e tráfego retransmitido, são estimados estatisticamente as médias e~~

~~desvios padrões ($\textit{lower bounds}$ - LB) e $\textit{upper bounds}$ (UB) para estas métricas. As~~

formulações para os LB foram apresentadas por \cite{dissertFabio}, e os UB são calculados a partir da média e do desvio padrão. Por fim, também são calculados UB para o custo de instalação física~~ae~~ de cada sub-rede.

A última etapa consiste na resolução do modelo TWA para ~~cadaas~~ sub-rede, ~~s,~~ respeitando os \textit{bounds} (UB e LB) calculados e visando utilizar o menor número possível de

comprimentos de onda. ~~O resultado~~A saída desta última fase fornece a solução do projeto, representado pelas topologias física e ~~lógicaalvirtu~~, ~~bem como a forma de~~ roteamento e alocação dos

comprimentos de onda, ~~em função daalém~~ da distribuição ~~das demandas deo~~ tráfego ~~esperadas~~. Esses resultados são referentes às sub-redes em separado, porém, quando são agrupados, representam o

resultado global ~~parad uma~~ WRON com topologias hierárquicas em malharede-em-hierarquia.

Como o número de comprimentos de onda multiplica a quantidade de variáveis do TWA, foi utilizada uma estratégia adotada anteriormente em \cite{sbpo09}. Nesta

estratégia ~~Ttenta-se~~mos

obter soluções com um comprimento de onda apenas e, caso não seja possível,
~~vamos~~ incrementa-sendo esse número até que seja possível encontrar enquanto
~~não for 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
~~\cite{ram02}~~. Estamos
considerando que o custo de instalação física é proporcional à ~~apenas a~~
distância entre os nós da rede, que determina~~representa~~ o comprimento dos
enlaces de fibra instaladaos entre os mesmos.

No projeto de topologias lógicas, o número de transceptores ~~da rede~~ normalmente
define as instâncias do problema ~~\cite{ram96}~~, 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 ~~\cite{Sivarajan01}~~. Por outro lado, ~~N~~neste trabalho, ~~nós apenas~~
~~limitamos~~ o número de transceptores foi limitado a um valor pré-definido,
permitindo que o modelo encontre soluções mais econômicas
para este parâmetro.

~~\subsection{Estrutura Hierárquica}~~

~~\label{sec:fitness}~~

Na metodologia proposta, Atanto a quantidade quanto e o tamanho dos
~~\textit{clusters}~~ estão sujeitos é livre, sendo definido apenas a um limite inferior
igual a mesmo número M_i para o mínimo de ~~\textit{clusters}~~ e o seu tamanho
mínimo. Para a escolha da estrutura hierárquica da rede foi implementado um
algoritmo genético foi implementado com a biblioteca ~~\{litshape Galib\}~~, sendo
utilizada a implementação. ~~O algoritmo adotado foi o~~
~~\textit{GADemeGA}~~, que mantém populações paralelas, com probabilidade de
migração a cada geração da evolução. **[COLOCAR REFERENCIA À**
DOCUMENTAÇÃO DO GALIB]. Os parâmetros de configuração das funções da
biblioteca

~~\textit{Galib}~~ foram mantidos em seus valores padrão e demonstraram desempenho

satisfatório.

Além da codificação do cromossomo e da escolha das funções da \textit{Galib} a serem utilizadas, o algoritmo genético se completa com a definição da sua função objetivo de avaliação, que atribuirá uma métrica de qualidade para os cromossomos $(\textit{fitness})$ **[COLOCAR REFERENCIA DE ALGORITMOS GENÉTICOS]**.

Dois parâmetros importantes no projeto de uma rede são os custos de instalação e operação da mesma \cite{bannister90, liu2008, guan}. 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 formadas se agrupar de modo que sejam constituídas por nós geograficamente próximos ~~façam parte do mesmo conjunto~~, haverá uma tendência de menor se reduzir o custo de instalação dos enlaces. Por esse motivo, considera-se aqui a distância

média entre os nós ~~é uma boa~~ como a métrica de otimização do para minimizar o custo de instalação físicao.

Não obstante, se entre dois nós de um mesmo $\textit{cluster}$ ~~houver que possuem uma grande quantidade de~~ demanda de tráfego ~~entre eles estiverem no mesmo~~ $\textit{cluster}$, ela poderá ser transmitida de forma transparente. Se estes dois nós estivessem em $\textit{clusters}$ diferentes, esta demanda de tráfego teria necessariamente que ser processada eletronicamente em pelo menos dois nós do ~~eles deixarão de rotear pelo~~

$\textit{backbone}$, ou seja, a quantidade de tráfego de acesso seria incrementada. ~~esse forte fluxo.~~ Definimos tráfego de acesso como sendo todo aquele que passa através do $\textit{backbone}$ ~~em ambos os sentidos, da rede cruza as hierarquias~~, ou seja, se

origina em ~~uma sub-rede~~ $\textit{cluster}$ com destino a outrao. 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 \ref{fig:ga.group} 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.

```
\begin{figure}[!htb]
\begin{center}
\includegraphics[scale=0.7, angle=270]{./figs/ga_group.eps}
\caption{Ilustração do processo de decisão do genético.}
\label{fig:ga.group}
\end{center}
\end{figure}
```

Deste modo, a função objetivo do algoritmo genético foi definida como a soma da distância média entre os nós do \textit{cluster} a hierarquia (M) com o total de tráfego de acesso ao \textit{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 tráfego e demandas e de distância de cada sub-rede. As matrizes de distâncias são apenas um subconjunto da original. Enquanto que as matrizes de tráfego e demandas acumulam nos nós de acesso todo tráfego que deverá entrar no \textit{cluster} e sair dele.

Nos experimentos que serão apresentados na próxima seção, as entradas das matrizes de demandas 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 **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 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 **objetivo avaliação do algoritmo de** genético (*fitness*), faz uso de um fator de **calibragem calibração** (\$C_a\$) a fim de tornar \$M\$ e \$T\$ compatíveis em termos de ordem de grandeza.

\subsection{Qualidade do Projeto das Sub-Redes}

\label{sec:subredes}

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

\subsubsection{Congestionamento e Tráfego Retransmitido}

\label{sec:subredes:estatisticas}

Foram geradas aleatoriamente, **P** para cada grau lógico, **geramos aleatoriamente uma amostra** de soluções para a topologia lógica da rede. Modelos de programação linear foram implementados em *AMPL* \cite{ampl} para distribuir o tráfego da rede sobre cada topologia lógica, **utilizando através de o solver resolvidor linear** *GLPK* (\i>GNU Linear Programming Kit - gnu.org/software/glpk). Assim, para cada **uma solução viável da amostra** é obtida a distribuição de tráfego ótima para o congestionamento da rede e também para o **total de** tráfego retransmitido **na rede** \cite{Renato06}. Dessa forma, estimamos a média e o desvio padrão das **populações amostras** 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 \cite[Seção 4.5]{estatistica}. Para a média, o intervalo de confiança pode ser obtido por \cite[Seção 4.4.1]{estatistica}:

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

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 \cite[Seção 3.4.5]{estatistica}:

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

Onde $t_{(n-1, p)}$ é a distribuição t de \textit{Student} com $n-1$ graus de liberdade, que faz compensar o efeito da maior incerteza embutida pelo uso 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

\cite[Seção 4.4.4]{estatistica}:

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

Onde $\chi^2_{(n-1, p)}$ é a distribuição \textit{Qui-Quadrado} com $n-1$ graus de liberdade e e' é a amplitude do intervalo de confiança dada pela amostra. Neste

caso, ~~vamos~~ incrementa-se 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~~ 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 \cite{estatistica}, ~~isto é~~ ~~por~~ não se conhecermos de antemão as distribuições estatísticas das populações.

Entretanto, trabalhando com

apenas uma amostra isso não é possível, mas ~~podemos~~ minimiza-se essa falta de erro na inferência adotando amostras iniciais grandes. E a definição do quão grande devem ser as

amostras iniciais ~~pode ser~~ foram aqui estimadas por empiricamente testes-piloto.

Os parâmetros estimados para o congestionamento darão suporte a escolha da restrição de capacidade máxima dos enlaces lógicos no TWA. E por sua vez, os parâmetros estimados para o tráfego retransmitido serão utilizados para definir um limite superior para essa métrica.

\subsubsection{Custo Físico}

\label{sec:subredes:custo_fisico}

A rede será projetada desde sua topologia física e a ~~nessa~~ metodologia proposta

neste trabalho visa obter uma alocação de recursos suficiente para atender aos requisitos

impostos de forma econômica, mas sem sacrificar o desempenho da rede.

Considera-se sendo que os enlaces de fibra óptica são bidirecionais e que estamos considerando com, o

custo de instalação físico é definido apenas pelo 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 do problema definida pelo limite máximo imposto ao número de transceptores. 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 por nó do custo de ligações físicas existentes por nó ($FE = (1/N) \cdot \sum_{mn} C_{mn} \cdot D_{mn}$) e a média do custo de todas as ligações físicas possíveis ($FP = \sum_{mn} C_{mn} / (N^2 - N)$). Isto que resulta na definição \ref{def:TIF}.

\begin{definicao}[TIF]

\label{def:TIF}

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

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

\textit{Onde:}

N = Número de nós da rede.

$C_{m,n}$ = Custo associado a ligação física entre o par de nós (m,n) .

$D_{m,n} \in \{0,1\}$ = Define a existência de ligação física entre o par (m,n) .

\end{definicao}

Para garantir a proporcionalidade, inicialmente calcula-se a TIF para uma rede real que seria usada como referência. E as redes a serem projetadas devem considerar este valor de referência para usariam

essa TIF de referência como limitante superior. Ou ainda, pode-se embutir uma folga (TIF_g), exigindo que a rede projetada tenha TIF 20\% ou 30\% abaixo da TIF de referência, por exemplo. Todavia, exigir um TIF_g muito grande pode acarretar reverter a solução do problema inviável em inviabilidade.

`\subsubsection{Restrições do TWA}`

`\label{sec:subredes:restricoes}`

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 a capacidade máxima de transmissão de tráfego por caminho óptico em enlaces lógicos.
`\cite{dissertFabio}`.

`\section{Resultados}`

`\label{resultados}`

Foram realizados testes computacionais com uma rede de 30 nós. As matrizes de tráfego e de 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 `\cite{cormen02}`, 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: `\textit{Intel Pentium}` 4 CPU 3.00GHz de 2 núcleos, com 2048 KB de `\textit{cache}`, 1.5GB de RAM, executando o sistema operacional `\textit{Kubuntu 9.04}`.

`\subsection{Composição das Sub-Redes}`

\label{resultados:sec:hierarquia}

Na separação dos nós em sub-redes, definimos $M_i = 3$, o número e tamanho mínimo de \textit{clusters}. O tamanho e número máximo de \textit{clusters} na hierarquia foram definidos como: $M_a = \lfloor N/M_i \rfloor = 30/3 = 10$. O fator de **calibragemcalibração** 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 **algoritmo** genético é interrompido se ficar 500 gerações sem haver melhoria **na solução**.

O tempo de execução do **algoritmo** genético foi de 30.76 minutos. A estagnação **definida** foi alcançada na geração 5473, tendo ~~sido o genético~~ visitada **ase** mais de 13.7 milhões de soluções. Destaca-se que a variação no valor da função **objetivode 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 \textit{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 \textit{backbone} foi $T = 51579.5$. Assim, considerando os pesos unitários e o fator de **calibragemcalibração** C_a , o \textit{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%.

\subsection{Estatísticas de Congestionamento e Tráfego Retransmitido}

\label{resultados:sec:estatisticas}

Para cada sub-rede, \textit{clusters} e \textit{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-piloto, estimou-se que os parâmetros estatísticos a serem inferidos as estatísticas atingiam estabilidade a partir de \$10^3\$ amostrassoluções viáveis por amostra, para os valores de confiança e erro adotados. Portanto, esse valor foi utilizado como tamanho mínimo para as amostras.

No decorrer desta seção, quando se fizer referência às sub-redes em estudo, a codificação que está apresentada na tabela \ref{tab:cod.id} será adotada para identificação do \textit{backbone} e dos \textit{clusters}. A tabela \ref{tab:cod.legenda} apresenta as legendas para as tabelas \ref{tab:result.est.cong}, \ref{tab:result.est.traf} e \ref{tab:ubs}, que serão utilizadas na apresentação dos resultados obtidos para as estatísticas de congestionamento e tráfego retransmitido nas sub-redes.

```
\begin{table}[!ht]
\begin{center}
\begin{tabular}{|c|c|c|c|}
\hline
Sub-rede & Tamanho & Identificação (ID) & \\
\hline
\textit{Backbone} & $ 5 $ & bk.t5 & \\
\hline
\textit{Cluster} 1 & $ 5 $ & cl1.t5 & \\
\hline
\textit{Cluster} 2 & $ 6 $ & cl2.t6 & \\
\hline
\textit{Cluster} 3 & $ 7 $ & cl3.t7 & \\
\hline
\textit{Cluster} 4 & $ 8 $ & cl4.t8 & \\
\hline
\textit{Cluster} 5 & $ 4 $ & cl5.t4 & \\
\hline
\end{tabular}
\end{center}
\caption{Identificação das sub-redes.}
\label{tab:cod.id}
```


`\end{table}`

`\begin{table}[!ht]`

`\begin{center}`

`\begin{tabular}{|ccc|}`

`\hline`

`GI & $$ & Grau lógico \\\`

`ID & $$ & Identificação da sub-rede \\\`

`LB & $$ & \textit{Lower bound} \\\`

`HLDA & $$ & Heurística HLDA \\\`

`Min & $$ & Mínimo amostral \\\`

`Max & $$ & Máximo amostral \\\`

`MED & $$ & Média amostral \\\`

`DP & $$ & Desvio padrão amostral \\\`

`% MEDn & $$ & Tamanho da amostra para média \\\`

`% DPn & $$ & Tamanho da amostra para desvio padrão \\\`

`t(s) & $$ & Tempo de execução em segundos \\\`

`CongDs & $$ & Desvios padrão para o UB de congestionamento \\\`

`UBCong & $$ & \textit{Upper bound} para congestionamento \\\`

`TRetrDs & $$ & Desvios padrão para o UB de tráfego retransmitido \\\`

`UBTRetr & $$ & \textit{Upper bound} para tráfego retransmitido \\\`

`\hline`

`\end{tabular}`

`\end{center}`

`\caption{Legenda para as tabelas \ref{tab:result.est.cong}, \ref{tab:result.est.traf}`
`e \ref{tab:ubs}.}`

`\label{tab:cod.legenda}`

`\end{table}`

Nas tabelas \ref{tab:result.est.cong} e \ref{tab:result.est.traf}, as porcentagens apresentadas são margens percentuais da solução obtida sobre relavtas ao LB, mais especificamente, quantos por cento acima do mesmo. Como \textit{lower bound}

para o congestionamento foi utilizado o MTB (\textit{Minimun Traffic Bound}), enquanto para o tráfego retransmitido utilizou-se o FTB (\textit{Forwarded Traffic Bound}). Ambos os métodos para cálculo de \textit{lower bounds}, foram apresentados em \cite{dissertFabio}. 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 \cite{ram96}.

GI	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\%	46.0\%	33 \\\
2	bk.t5	4448	59\%	21\%	230\%	71\%	52.0\%	89 \\\
2	c1.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 \\\

Resultado das estatísticas para o congestionamento.

label{tab:result.est.cong}

```

\begin{table}[!ht]
\begin{center}
\begin{tabular}{|cc|cccccc|c|}
\hline
GI & ID & LB & HLDA & Min & Max & MED & DP & t(s) \\
\hline
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 \\
\hline
2 & c5.t4 & 1400 & 100\% & 89\% & 290\% & 140\% & 66.0\% & 69 \\
2 & bk.t5 & 14000 & 58\% & 17\% & 100\% & 37\% & 21.0\% & 15 \\
2 & c1.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 \\
\hline
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 \\
\hline
4 & c4.t8 & 3500 & 110\% & 97\% & 530\% & 140\% & 38.0\% & 510 \\
\hline
\end{tabular}
\end{center}
\caption{Resultado das estatísticas para o tráfego retransmitido.}
\label{tab:result.est.traf}
\end{table}

```

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 tanto para o congestionamento quanto para o tráfego retransmitido. Para as duas métricas, essa quantidade de desvios padrão é múltipla de \$4/20,5\$ e foram definidas como a maior possível, desde que o UB resultante

não ultrapasse o respectivo mínimo amostral. A tabela \ref{tab:ubs} mostra os valores resultantes desta regra. Para os casos em que $\$CongDs = 0\$$, significa que o UB para o congestionamento foi definido como a própria média amostral ($\$MED\$$).

Calculamos a $\$TIF\$$ para a rede NFSNET \cite{ram02}. 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.

```

\begin{table}[!ht]
\begin{center}
\begin{tabular}{|cc|cc|cc|}
\hline ID & GL & CongDs & UBCong & TRetrDs & UBTRetr \\\hline
bk.t5 & 1 & 1.0 & 17636 & 1.0 & 51437 \\\hline
bk.t5 & 2 & 0.5 & 6434 & 0.5 & 18088 \\\hline
c1.t5 & 1 & 1.0 & 5883 & 1.0 & 16835 \\\hline
c1.t5 & 2 & 0.0 & 3224 & 0.5 & 5774 \\\hline
c2.t6 & 1 & 1.0 & 6558 & 1.5 & 24601 \\\hline
c2.t6 & 2 & 0.0 & 3359 & 1.5 & 7092 \\\hline
c2.t6 & 3 & 0.5 & 2002 & 1.0 & 4569 \\\hline
c3.t7 & 1 & 1.5 & 7836 & 1.5 & 35938 \\\hline
c3.t7 & 2 & 0.0 & 3950 & 2.0 & 9625 \\\hline
c3.t7 & 3 & 0.0 & 2768 & 1.0 & 6872 \\\hline
c4.t8 & 1 & 2.0 & 8984 & 2.5 & 51115 \\\hline
c4.t8 & 2 & 0.0 & 4379 & 1.5 & 15137 \\\hline
c4.t8 & 3 & 0.0 & 3071 & 1.0 & 9981 \\\hline
c4.t8 & 4 & 0.5 & 2056 & 1.0 & 7194 \\\hline
c5.t4 & 1 & 1.5 & 4306 & 1.0 & 8555 \\\hline
c5.t4 & 2 & 0.5 & 2353 & 0.5 & 2991 \\\hline
\end{tabular}
\end{center}
\caption{UB calculados para congestionamento e tráfego retransmitido.}
\label{tab:ubs}

```

\end{table}

\subsection{Resolução das Sub-redes com TWA}

\label{resultados:sec:tw}

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

Para cada TIF_g , a estratégia adotada foi, partindo do menor grau lógico ($G_l=1$), fixar nos valores mínimos o número de comprimentos de onda, e executar o modelo básico do TWA com as adições indicadas na seção \ref{sec:subredes:restricoes}. Um \textit{solver}resolvedor linear para problemas MILP é instanciado com essa configuração. Enquanto o \textit{solver}resolvedor linear retornar que o problema é insolúvel, o número de comprimentos de onda (W) será incrementado.

Se o \textit{solver} não encontrarnão for encontrada uma solução viável dentro de 10^4 segundos, então-ele processo é abortado e é aplicado o mesmo procedimento de quando a solução é insolúvel. Isso é feito com o objetivo de folgarrelaxar as restrições de modo que o \textit{solver}resolvedor linear possa encontrar uma solução viável mais rapidamente, sacrificando um pouco a sua qualidade das restrições. Essas situações em que o modelo precisou ser calibrado, que chamaremos de \textit{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 \cite{sbpo09}.

Se uma solução viável é encontrada, o ~~\textit{solver}~~ 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 ~~\textit{solver}~~ 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. ~~.- Não sendo necessário perseguir otimalidade neste ponto.~~

Utilizamos o ~~\textit{solver}~~ resolvidor line SCIP (~~\textit{Solving Constraint Integer Programs}~~ - scip.zib.de) para encontrar as soluções viáveis para as diversas s instâncias do TWA.

A tabela \ref{tab:cod.legenda2} apresenta as legendas para a tabela \ref{tab:result.twa}, que será utilizada na apresentação dos resultados obtidos para o projeto completo das sub-redes utilizando o modelo TWA.

```
\begin{table}[!ht]
\begin{center}
\begin{tabular}{|ccc|}
\hline
ID & $=$ & Identificação da sub-rede \\
GI & $=$ & 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
\end{tabular}
\end{center}
\end{table}
```

```

\hline
\end{tabular}
\end{center}
\caption{Legenda para a tabela \ref{tab:result.twa}.}
\label{tab:cod.legenda2}
\end{table}

```

```

\begin{table}[!ht]
\begin{center}
\begin{tabular}{|cc|cc|ccccc|c|}
\hline ID & GI & W & TIFg & TT & CF & TIF & TR & CG & Ti(s) \\\hline
bk.t5 & 1 & 1 & 70\% & 5 & 51 & 0.54 & 51084 & 17526 & 0.1 \\\hline
bk.t5 & 2 & 2 & 70\% & 10 & 51 & 0.54 & 17667 & 6434 & 0.4 \\\hline
c1.t5 & 1 & 1 & 20\% & 5 & 79 & 1.42 & 16635 & 5882 & 1 \\\hline
c1.t5 & 2 & 2 & 20\% & 9 & 79 & 1.42 & 5755 & 3003 & 11 \\\hline
c2.t6 & 1 & 2 & 40\% & 6 & 68 & 1.07 & 24484 & 6523 & 98 \\\hline
c2.t6 & 2 & 3 & 40\% & 12 & 68 & 1.07 & 5556 & 2730 & 9 \\\hline
c2.t6 & 3 & 4 & 40\% & 16 & 68 & 1.07 & 4267 & 2002 & 74 \\\hline
c3.t7 & 1 & 1 & 30\% & 7 & 85 & 1.24 & 35709 & 7821 & 37 \\\hline
c3.t7 & 2 & 3 & 30\% & 13 & 87 & 1.26 & 7755 & 2961 & 215 \\\hline
c3.t7 & 3 & 3 & 30\% & 18 & 84 & 1.23 & 6824 & 2768 & 2859 \\\hline
c4.t8 & 1 & 1 & 40\% & 8 & 80 & 1.09 & 50807 & 8982 & 698 \\\hline
c4.t8 & 2 & 2 & 40\% & 16 & 79 & 1.06 & 7976 & 3582 & 17 \\\hline
c4.t8 & 3 & 2 & 40\% & 16 & 79 & 1.07 & 7069 & 3050 & 58 \\\hline
c4.t8 & 4 & 3 & 40\% & 22 & 77 & 1.04 & 6590 & 2056 & 587 \\\hline
c5.t4 & 1 & 1 & 20\% & 4 & 65 & 1.36 & 8546 & 4304 & 0.4 \\\hline
c5.t4 & 2 & 2 & 20\% & 7 & 65 & 1.36 & 233 & 1515 & 0.1 \\\hline
\end{tabular}
\end{center}
\caption{Resumo dos resultados com TWA.}
\label{tab:result.twa}
\end{table}

```

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.

~~Então relaxamos~~ Neste caso, os UB para congestionamento e tráfego retransmitido foram relaxados, reduzindo-se em \$1/20,5\$ o número de desvios padrão abaixo da média para ambos os UB, nas duas refridas instâncias.

A última coluna da tabela \ref{tab:result.twa}, mostra o tempos de execução da última iteração da instância, aquela que retornou uma solução viável. ~~Gomo~~

~~pode-se notar~~ 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 folgarrelaxar os UB de tráfego e

congestionamento, 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 pelo \textit{solver} para todas as instâncias testadas durante o processo de busca.

\section{Conclusão}

Foi apresentado um procedimento para a resolução de WRON com topologias hierárquicas em malha em hierarquia uma rede, 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. Os UB estabelecidos para congestionamento e tráfego retransmitido a partir do processo de amostragem e estimativa das estatísticas garantiram ~~boas~~ soluções melhores que as obtidas por outros métodos para a rede de 30 nós estudada. ~~das sub-redes permitiu a economia na quantidade de comprimentos de onda empregados na resolução~~O método ~~iterativo utilizado~~

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 algoritmo 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. ~~Isso fica claro~~ 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 a resolução o projeto de redes com topologia em malha genéricas, ~~para isso deveria-se eliminar a etapa inicial com o algoritmo~~ genético, outra alternativa seria a investigação das variações permitidas para o modelo TWA \cite{dissertFabio}, ~~tratando~~considerando diferentes restrições e funções objetivo.

\bibliographystyle{abnt-num}

\bibliography{biblio}

%

\end{document}