

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Rafael Freitas de Amorim

**Problemas de Programação Inteira em Redes Ópticas de
Telecomunicações**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Oscar Porto

Rio de Janeiro, 2 fevereiro de 2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



Rafael Freitas de Amorim

**Problemas de Programação Inteira em Redes Ópticas de
Telecomunicações**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Oscar Porto

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Marco Antonio Grivet Mattoso Maia

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Rodolfo Sabóia Lima de Souza

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Marcos Azevedo da Silveira

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico

Rio de Janeiro, 2 de fevereiro de 2006

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Rafael Freitas de Amorim

Graduou em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicação e Sistema de Apoio à Decisão em Julho de 2003. Em Agosto de 2003, iniciou o seu mestrado na mesma instituição na área de Métodos de Apoio à Decisão

Ficha Catalográfica

Amorim, Rafael Freitas de

Problemas de programação inteira em redes ópticas de telecomunicações / Rafael Freitas de Amorim ; orientador: Oscar Porto. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2006.

82 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Programação Inteira. 3. SDH. 4. Network Design. 5. Telecomunicação. 6. Redes ópticas. I. Porto, Oscar. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Para minhas avós,
Elzira e Maria das Dores

Agradecimentos

Ao Professor Oscar, por toda a orientação, incentivo e apoio.

À CAPES pelo fornecimento de bolsa de fomento, sem a qual seria impossível a realização deste trabalho.

Ao meu amor, Aline, com seu sorriso e carinho, tudo fica mais fácil.

Aos meus pais, Lauro e Cláudia, por todos ensinamentos e carinho nos momentos difíceis dessa caminhada.

Ao Alexandre José, pelo apoio e incentivo durante todo período de desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus irmãos, Leonardo e Pedro, pela paciência ao longo dessa jornada.

Ao Bruno Flach, Leonardo Scheiner e Gustavo Filizola, por toda atenção, esclarecimentos e apoio nas dúvidas e momentos difíceis.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

Resumo

Amorim, Rafael Freitas. **Problemas de Programação Inteira em redes ópticas de telecomunicações**. Rio de Janeiro, 2005. 82p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Impulsionadas pelo crescimento do mercado corporativo e pela prestação de serviços para grandes clientes, as operadoras de serviços de telecomunicação estão buscando processos automatizados e redução de custo no desenvolvimento de novos projetos de redes de telecomunicações. Nesse cenário, dois modelos de Programação Inteira são apresentados buscando uma minimização de custos. O primeiro para o problema de planejamento de novas redes. E segundo para o problema de configuração de *trails* nas redes SDH. Uma introdução sobre meios de transmissão, redes de telecomunicações, topologias mais utilizadas e sistemas de proteção são apresentados. Por fim, em ambos problemas, são apresentados estudos comparativos com situações reais, com o intuito de validar os modelos.

Palavras-chave

Programação Inteira; Redes Ópticas; SDH; Planejamento de redes; Telecomunicação

Abstract

Amorim, Rafael Freitas. **Problemas de Programação Inteira em redes ópticas de telecomunicações**. Rio de Janeiro, 2005. 82p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Stimulated by the growth of the corporate market and by the services dedicated to big customers, providers are searching for, even more nowadays, automated process and cost reduction on the development of new telecommunications' networks projects. In that setting, two models of Integer Programming will be presented, seeking a minimization of costs. At first, for the problem of planning of new networks, and second for the problem of configuration of trails in the SDH networks. Beyond that, an introduction about transmission lines, networks of communication, topology more utilized and systems of protection will be presented. In both problems, comparing real situations, with the purpose of validate the models.

Keywords

Integer Programming; Optical Network; SDH; Network Design; Telecommunication

Sumário

1 Introdução	12
1.1. Motivação	12
1.2. Objetivo	13
1.3. Estrutura da dissertação	14
2 Meios de transmissão utilizados em redes de telecomunicações	15
2.1. Introdução	15
2.2. As Redes de Comunicação	16
2.3. Fibra Óptica	18
2.3.1. Transmissão do sinal óptico	18
2.4. Par metálico	20
2.5. Rádio Digital	21
2.5.1. Transmissão	21
2.5.2. Enlace ponto a ponto e multi-ponto	24
3 Redes de Comunicação	28
3.1. SDH – Hierarquia Digital Síncrona	28
3.1.1. Estrutura de multiplexação em redes SDH	29
3.1.2. Taxas de transmissão de dados	31
3.2. Topologias	32
4 História dos estudos de transmissão óptica	34
4.1.1. Estudos sobre Redes Ópticas	34
4.1.2. Estudos sobre redes ópticas Wide-area	36
4.1.3. Estudos sobre planejamento e reconfiguração de topologia virtual	37
4.1.4. Estudos sobre planejamento de redes de transmissão	40
5 Problema de planejamento de novas redes de telecomunicações	44
5.1. Modelo	45
5.1.1. Índices	45
5.1.2. Conjuntos	46
5.1.3. Dados	46

5.1.4. Variáveis do problema	47
5.1.5. Formulação	48
5.2. Instâncias resolvidas	53
5.3. Resultados computacionais	56
6 Problema de Configuração de Trails nas Redes SDH	60
6.1. Modelo	62
6.1.1. Índices	62
6.1.2. Conjuntos	62
6.1.3. Dados	63
6.1.4. Variáveis	63
6.1.5. Modelo	63
6.2. Instâncias resolvidas	66
6.3. Resultados computacionais	68
7 Conclusão e Trabalhos Futuros	73
8 Referências	75

Lista de figuras

Figura 1 - Estrutura da rede, atual, em <i>backbone</i> , metropolitana e acesso	17
Figura 2 - Corte seccional da fibra	18
Figura 3 - Refração e reflexão do raio	19
Figura 4 - Propagação do raio na fibra	19
Figura 5 – Transmissão ponto a ponto entre dois pontos fixos	22
Figura 6 – Diagrama funcional do enlace digital ponto a ponto.	23
Figura 7 – Estrutura de multiplexação da SDH	29
Figura 8 – Tipos de topologias e variações	32
Figura 9 – Classificação dos estudos sobre rede óptica	35
Figura 10 – Topologias dos dez problemas tratados	55
Figura 11 – Topologias finais dos problemas	58
Figura 12 – Tipo de topologia de malha	60
Figura 13 – Representação de cada nó real no modelo proposto	61
Figura 14 – Expansão dos nós virtuais em função dos nós reais.	61
Figura 15 – Ocupação das redes antes do modelo	66
Figura 16 – Topologias adotadas nos problemas	67
Figura 17 – Comparação da ocupação antes e depois da modelo	72

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de Hierarquia Digital	23
Tabela 2 – Mapeamento de tributários nos contêineres	29
Tabela 3 – Composição dos contêineres virtuais de ordem inferior (LO VCs)	29
Tabela 4 – Composição dos contêineres virtuais de ordem superior (HO VCs)	30
Tabela 5 – Conteúdo da unidade de Tributário (TU)	30
Tabela 6 – Conteúdo do Grupo de Unidades de Tributário (TUG)	30
Tabela 7 – Conteúdo da Unidade Administrativa (AU)	31
Tabela 8 – Conteúdo do Grupo de Unidades Administrativas (AUG)	31
Tabela 9 – Nível do SDH	31
Tabela 10 – Tabela das características técnicas e econômicas por tecnologia	54
Tabela 11 – Tabela com as demandas dos clientes dos dez problemas	56
Tabela 12 - Tabela com os resultados dos problemas	59
Tabela 13 – Consolidação dos resultados	72

1 Introdução

1.1. Motivação

Nos últimos anos, a expansão dos serviços oferecidos para transmissão de voz, dados e imagens ao mercado consumidor provocou diversos estudos para o planejamento das redes de telecomunicações com o menor custo de implantação para as operadoras e com a melhor ocupação dos recursos disponíveis.

Essa expansão atingiu o apogeu, no período de pós-privatização do setor das telecomunicações brasileiro. Com o objetivo de alcançar novas áreas, na busca de novos clientes, foram investidos bilhões de dólares pelas novas empresas. Outro fator que incentivou o investimento foi a necessidade de alcançar as metas do plano de universalização da ANATEL. Além disso, um novo nicho de mercado surgiu nesse momento, chamado mercado corporativo. São empresas que precisam interligar suas sedes, com altas taxas de velocidades, alta disponibilidade e qualidade. E, por se tratar de um cliente mais exigente, a eficiência do serviço prestado obrigou um aumento dos investimentos na rede.

Essa nova fase tinha duas metas como objetivo:

- Utilizar interfaces com recursos suficientes, para escolher rotas alternativas, após falhas nos enlaces;
- Utilizar topologias que abranjam o maior número de nós possíveis para tornar o investimento altamente rentável.

Para atender essa demanda, as operadoras ou prestadoras de serviços de telecomunicações começaram a buscar a rede ótima que se caracteriza, por parte das operadoras: na maximização da utilização dos equipamentos presentes para interligação dos clientes às estruturas de transmissão, e minimização dos custos inerentes (pessoal e equipamento). Além disso, a rede

deve ser modular permitindo flexibilidade para inclusão de novos clientes, gradualmente, em função da demanda do mercado.

Nesse período, muitos estudos deram suporte na busca do melhor aproveitamento das redes existentes e auxiliavam os projetos das novas redes que estavam sendo construídas.

A utilização de técnicas de Pesquisa Operacional auxiliaram o planejamento estratégico das operadoras. A garantia da solução ótima, qualidade da informação e rapidez para alcançar os resultados aproximaram ainda mais os especialistas das operadoras aos estudiosos na área.

Para atender essa demanda são utilizadas três tecnologias, com mais frequência: fibra óptica, par metálico e rádio. E são esses meios de transmissão que suportam cerca de 98% das redes existentes no Brasil.

1.2. Objetivo

O objetivo desta dissertação é resolver dois problemas de planejamento de redes de telecomunicações utilizando Programação Matemática. O primeiro trata do planejamento de uma nova rede, determinando qual o melhor meio de transmissão (fibra óptica, par metálico e rádio digital), em função da demanda de clientes. O objetivo é garantir a melhor rede a ser implantada, para atender a demanda dos clientes, ou seja, projetar uma nova rede. Hoje em dia, esse tipo de demanda consome muitos recursos nas operadoras, principalmente, porque o foco das prestadoras brasileiras é aumentar a receita com o mercado corporativo. Esses projetos podem custar para operadora mais de R\$ 5 milhões e caso não sejam bem executados poderão ocupar a rede de uma forma descontrolada, provocando baixo desempenho e má ocupação dos recursos.

O outro problema abordado nessa tese é o de configuração dos circuitos virtuais, com uma banda de 155 MB, utilizado para transportar circuitos de baixa hierarquia (um circuito de 34 MB ou 2 MB) entre dois elementos ou dois pontos da rede [1]. Esses circuitos são chamados de *trails*, nas redes SDH e tem como objetivo o melhor aproveitamento da rede de transporte SDH. Em função, do legado do período pré-privatização, falhas no cadastro, erro humano e crescimento desordenado, as redes existentes estão com alta ocupação e baixo desempenho. Ao final desse trabalho é proposto um modelo cujo objetivo é determinar uma nova configuração da rede virtual de transporte.

1.3. Estrutura da dissertação

No capítulo dois, são apresentados os três meios de transmissão mais usados no Brasil: fibra óptica, rádio digital e par metálico. É feita uma explanação sobre as três tecnologias, sem aprofundar muito nas características técnicas. Ao final do capítulo o leitor deverá conhecer características, restrições, qualidades e defeitos de cada tecnologia.

No capítulo três, são abordadas as características da rede SDH que suporta as redes de serviços das operadoras. Benefícios e restrições da tecnologia são apresentados. Além disso, são introduzidos os tipos de proteção com a visão física e lógica e as topologias utilizadas nos projetos das redes. Como no capítulo anterior, os assuntos abordados são apresentados de uma forma genérica, sem detalhes técnicos e através de diagramas, figuras e tabelas.

No capítulo quatro, são apresentados estudos de destaque em relação aos problemas dessa dissertação. Através de uma breve explicação, o leitor pode relacionar e conhecer os problemas e soluções apresentadas.

No capítulo cinco, é apresentado o problema de planejamento de novas redes de telecomunicações com as suas características, premissas, modelo matemático, instâncias e resultados computacionais. Ao final do capítulo, são apresentados estudos comparando o resultado de projeto de uma operadora e o apresentado pelo modelo.

No capítulo seis, é apresentado o problema de configuração dos circuitos virtuais de transporte, chamados *trails*, na rede SDH. Serão apresentados todas as características, premissas, modelo matemático, instâncias e resultados computacionais. Comparações com anéis configurados na prática e resultados dos modelos ilustram a eficiência e qualidades do modelo.

No capítulo sete, são destacadas as principais conclusões deste trabalho, assim como sugestões de trabalhos futuros.

Finalmente, no capítulo oito, são listadas as referências bibliográficas.

2

Meios de transmissão utilizados em redes de telecomunicações

2.1.

Introdução

Atualmente, as estruturas das redes de comunicação são classificadas conforme a escala: rede de acesso, rede metropolitana e rede *backbone*. Nesse capítulo, introduziremos as diferentes tecnologias de transmissão nessas redes.

Hoje em dia, geralmente, as redes das prestadoras de serviços de telecomunicações utilizam redes suportadas por três tecnologias: fibra óptica, par metálico e rádio digital. A escolha desses meios de transmissão é baseada em aspectos econômicos, geográficos, sociais ou técnicos. Basicamente, um critério muito utilizado é de usar par metálico para rede de acesso nas grandes e médias cidades, fibra óptica para conexão entre cidades, estados ou países e rádio como rede de acesso para pequenas cidades ou conexão entre pontos que o relevo não permita a passagem da fibra.

A maioria das redes de transmissão, das operadoras, foi construída no período em que o controle dos serviços era de responsabilidade do governo e a tecnologia predominante era a de par metálico. O objetivo era atender a demanda pelo serviço comutado e esta opção não precisava de um alto investimento. Além disso, nesse período a utilização de fibra óptica como meio de acesso ainda estava em desenvolvimento e ainda não era economicamente viável.

Outra característica marcante é a diversidade de fabricantes por tecnologia, consequência, também, do período estatal do mercado de telecomunicação, onde, as decisões de compra eram tomadas em função de licitações e não como a melhor solução técnica.

Nesse capítulo, descreveremos as três tecnologias. Ilustrando dificuldades de implantação, manutenção e gerenciamento. Vale ressaltar que essas tecnologias serão utilizadas na resolução dos problemas propostos por essa dissertação.

2.2. As Redes de Comunicação

Com a disseminação da Internet podemos acessar qualquer tipo de informação, em alta velocidade, em qualquer momento e em qualquer ponto do planeta. E com o aumento dos produtos oferecidos, como jogos on-line, videoconferências, VoIP e transmissão de TV, a demanda por banda larga exige uma ampliação e melhor utilização dos meios de transmissão existentes.

Uma tecnologia como fibra óptica possui os requisitos necessários para suportar a demanda necessária para os aplicativos acima mencionados, porque é potencialmente capacitada em termos de limite de banda (aproximadamente 50 terabits por segundo) [2, 3], baixo sinal de atenuação, baixo sinal de distorção e baixo consumo de energia elétrica. Por causa, de todas essas qualidades mencionadas, em inúmeras redes a tecnologia utilizada na camada física é a fibra. Porém, o seu alto custo de implantação e manutenção não a torna viável para todos os casos, e com isso, outras duas tecnologias são amplamente requisitadas para atender demandas específicas: rádio e par metálico.

Por outro lado, a tecnologia de rádio digital como meio de transmissão atinge localidades onde o acesso físico é impossibilitado por causa do relevo. Com um alto custo de implantação devido à construção de torres e toda infraestrutura que suporta as antenas, a sua utilização só é considerada em situações crônicas. Com banda entre 2 Mbps a 155 Mbps, sua utilização foi determinante na implantação dos *backbones* da região norte e interiores dos grandes estados do Brasil. Um problema marcante nessa tecnologia é o custo de manutenção, pois como é utilizada em locais de difícil acesso, os reparos ficam muito dispendiosos.

Por outro lado, a tecnologia baseada em par metálico é bem capilarizada nas grandes capitais, por ser o meio corrente de transmissão do serviço de voz. Porém, para circuitos de baixa velocidade ou serviços de pequeno porte, o meio mais utilizado é o par metálico. Como as redes de transmissão das operadoras foram estruturadas em função do legado do período estatal, o alcance dessa rede é de quase 100% nos novos pontos que entram na rede. Por outro lado, uma característica negativa é a limitação de banda que impede de ser utilizada em muitos produtos das empresas.

Atualmente, as redes de comunicação são sub-divididas em três tipos: acesso (dimensões de 1-10 km), metropolitano (em torno de 10-100 km) e *backbone* (maior que 100 km), conforme Fig. 1. Cada tipo de sub-rede possui um

conjunto de funções diferentes e cada uma tem um conjunto diferente de desafios, requisitos tecnológicos e problemas pesquisados.

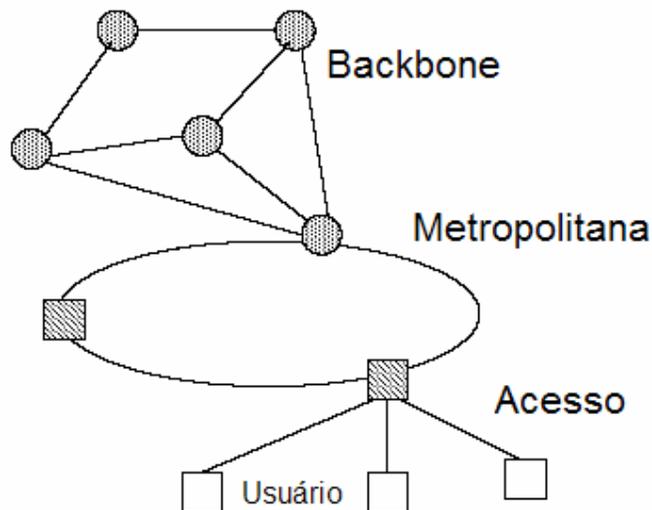


Figura 1 - Estrutura da rede, atual, em *backbone*, metropolitana e acesso

As redes de acesso conectam os usuários (casa ou comércio) para prover o serviço, em outras palavras, ela serve como “*last mile*” para o fluxo da informação. Em geral, o *last mile* torna-se o gargalo da infra-estrutura da rede [4]. É nessa sub-divisão da rede que encontramos a maior presença da tecnologia de par metálico, devido ao serviço comutado, cujo baixo custo e capilaridade facilitam o atendimento aos clientes.

As redes metropolitanas (ou metro) cobrem grandes regiões geográficas, ou seja, centenas de quilômetros quadrados. Essa sub-divisão de rede interconecta as redes de acesso com o *backbone* das operadoras. Normalmente, a camada física na rede metropolitana é baseada no conceito SONET/SDH.

A rede *backbone* possui nós de rede ópticos interconectados por malha com os *links* de fibra. O tráfego do usuário final é coletado pela rede de acesso e enviado para o *backbone* através da rede metropolitana. O planejamento e gerenciamento desse *backbone* óptico são uma área de estudos amplamente investigada.

2.3. Fibra Óptica

Fibra óptica é o meio físico para transporte dos sinais em redes ópticas. A sua geometria será a seguir apresentada assim como suas propriedades e características de transmissão serão resumidas.

2.3.1. Transmissão do sinal óptico

O material constituinte das fibras ópticas é o silício. Um corte seccional numa fibra é mostrado na figura 2. É no núcleo que a luz viaja e este é envolvido por um manto que mantém os raios dentro do núcleo. O tamanho do núcleo da fibra óptica determina as características de propagação da luz. Cada sinal óptico é gerado por inúmeros pulsos, e todos se propagam ao mesmo tempo na fibra. Isto ocorre em fibras *multimode*, porém pode causar problemas com cada onda chegando ao final da fibra fora de sincronização. A maioria das redes óptica moderna utiliza fibras *singlemode*, que possui um núcleo menor que a *multimode*. O tamanho do núcleo é pequeno o bastante para garantir a passagem de único pulso de cada sinal óptico que viaja na fibra, evitando assim problemas na recepção final. Para se ter uma idéia do tamanho, em uma fibra *singlemode* o núcleo possui, normalmente, em torno de 10 micrometros de diâmetro e o manto é mais de 10 vezes este tamanho, aproximadamente 125 micrometros. Uma camada de polímero é adicionada para proteção e todo material termina possuindo cerca de 0,25 milímetros de diâmetro.

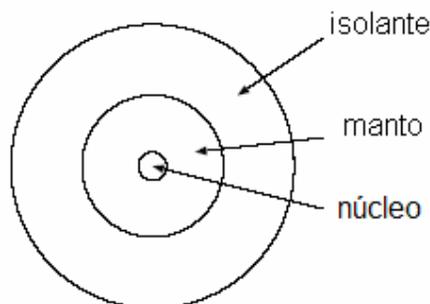


Figura 2 - Corte seccional da fibra

O sinal óptico é propagado pelas fibras por milhares de quilômetros. A figura 3 ilustra o princípio da reflexão entre dois materiais com diferentes índices de refração. O índice de refração é a razão entre a velocidade da luz no espaço e a

velocidade da luz no meio. O índice de refração do meio 1 é n_1 e o índice de refração do meio 2 é n_2 . As relações entre o ângulo incidente θ_i , o ângulo de reflexão θ_r , e o ângulo do raio transmitido θ_t são:

$$\theta_r = \theta_i \quad (2.1)$$

$$n_1 \cdot \text{sen}(\theta_i) = n_2 \cdot \text{sen}(\theta_t) \quad (2.2)$$

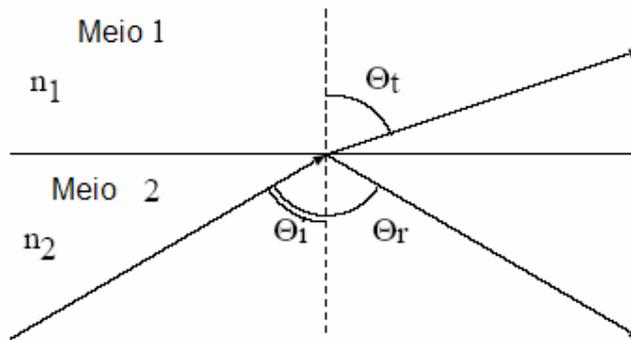


Figura 3 - Refração e reflexão do raio

A equação 2.2 é chamada Lei de Snell, e descreve o ângulo de refração do raio na borda de dois meios diferentes. Há um ângulo crítico θ_c para o raio incidente, onde

$$\theta_c = \text{sen}^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.3)$$

Para ângulos maiores que θ_c a energia do raio incidente é totalmente refletida resultando no raio guiado. Raios guiados são usados para transmitirem os sinais ópticos.

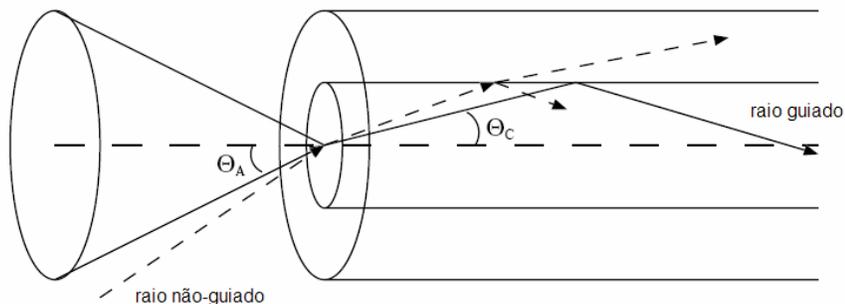


Figura 4 - Propagação do raio na fibra

O núcleo da fibra possui índice de refração n_1 e o manto possui um índice de refração ligeiramente menor n_2 ($n_2 < n_1$). A Figura 4 ilustra a propagação do raio de luz na fibra. O raio de luz entra na fibra, com um ângulo incidência suficientemente pequeno, propaga-se através da fibra refletindo-se nas paredes do núcleo. Um raio não-guiado que entra na fibra com um ângulo grande é parcialmente refratado em cada salto. O maior ângulo de um raio guiado é chamado de ângulo de aceitação θ_A , e pode ser calculado de acordo com o índice de refração do meio. Se o raio penetra na fibra a partir do ar, o ângulo de aceitação é dado por:

$$\theta_A = \sin^{-1}\left(\sqrt{n_1^2 - n_2^2}\right) \quad (2.4)$$

Nos trechos com equipamentos de WDM (*Wavelength-division multiplexing*), a largura de faixa da fibra é dividida em diversos canais, cada um operando com diferentes comprimentos de onda. O número de canais que pode existir em uma única fibra é limitado, primeiramente, pelo total de largura de faixa disponível na fibra e o espaçamento entre os canais [5, 6]. Convencionalmente, as fibras possuem baixa atenuação na faixa de 1.335 nm – 1.625 nm. O comprimento de onda dos canais deve ser suficientemente espaçado evitando sobreposição de sinais entre os canais, e conseqüentemente interferência entre os canais. No DWDM (*Dense wavelength-division multiplexing*) um grande número de comprimentos de ondas (em torno de 160) é utilizado em uma fibra. Uma alternativa é a tecnologia WDM com um menor número de comprimentos de onda (menos que 10).

2.4. Par metálico

Sendo o meio de transmissão mais antigo entre os tratados nessa dissertação, suas características voltadas para o serviço comutado limitam sua área de atuação. Por outro lado, não existe um meio de transmissão com uma capilaridade equivalente ao par metálico.

Composto por dois fios de cobre, isolados e com aproximadamente 1 mm de diâmetro formam uma espiral, como uma molécula de DNA [1]. Essa disposição tem o objetivo de reduzir a interferência elétrica, provocada por outros

pares próximos, pois dois fios em paralelo constituem uma antena simples, e esta não é a função desejada para o par metálico.

Como já foi dito, a principal aplicação do par metálico é no sistema telefônico. Outra vantagem, que o par possui é de não precisar de amplificadores para distâncias longas.

Em prédios, se os pares que sobem no mesmo duto para atender um andar, por exemplo, não estiverem bem trançados, os usuários sofreram de interferência ou ruído ao utilizar o serviço prestado.

Apesar de poder ser usado, tanto para transmissão digital e analógica, a sua largura de faixa depende do diâmetro do fio e da distância entre seus extremos. Apesar de um desempenho limitado, o seu baixo custo garante a permanência e viabilidade na sua utilização.

Hoje em dia, as operadoras utilizam essa rede para fornecer, por exemplo, conexões de banda larga. Porém a limitação em relação à distância impossibilita muitos usuários de terem acesso a esse serviço, pois se encontram longe da estação mais próxima. Através de um teste de avaliação do local efetuado no momento da pré-venda, muitos usuários são desqualificados, pois não teriam um serviço de qualidade aceitável.

2.5. Rádio Digital

Rádio digital ponto a ponto é mais um meio de comunicação utilizado em redes de telecomunicações. Como a fibra óptica, essa tecnologia pode ser utilizada nos três tipos de sub-divisões das redes: acesso, metropolitana e *backbone*.

Com um alto custo de implantação e manutenção, esse meio é utilizado em localidades de difícil acesso, longe dos centros urbanos e em relevos que impossibilitam a implantação de fibra ou par metálico.

Nos sub-capítulos seguintes serão apresentadas características e propriedades desse meio de comunicação.

2.5.1. Transmissão

Todo enlace de rádio digital é utilizado para transmissão de informação entre dois pontos fixos, tendo o espaço livre como meio de propagação. Por conseqüência, muitos dos problemas, do dia-dia, ficam fora de controle.

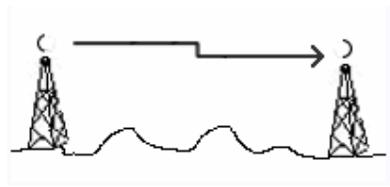


Figura 5 – Transmissão ponto a ponto entre dois pontos fixos

As principais aplicações de enlaces rádio digital ponto a ponto são:

- Rede de transporte das operadoras de telefonia fixa e celular. São muito utilizados pelas operadoras de celular na interligação de ERBs (Estação Rádio Base) com as CCCs (Central de Comutação e Controle);
- Redes de dados para atendimento de clientes corporativos, principalmente na implantação do acesso;
- Redes de distribuição de sinais de TV;
- Provedores de internet.

Nessa tese, o foco será na sua utilização para redes de dados, pois esse meio de transmissão é utilizado para conectar clientes em locais afastados dos grandes centros urbanos e em localidades que o relevo impede a implantação de fibra ou par metálico. No Brasil, esse meio é amplamente difundido nos interiores dos estados e na região norte.

Apesar do seu alto custo de implantação (pois envolve muitas vezes construção de torres, aluguel de terreno e transporte de material) essa solução sempre é utilizada para conectar muitos pontos em projetos para clientes corporativos. Além disso, a topologia predominante, quando envolve rádio digital, é a estrela.

Para transmissão, a informação (voz, dados e imagens) é digitalizada e transportada em canais padronizados (SDH e PDH). No próximo capítulo estaremos detalhando mais esses canais padronizados.

Todos os passos para essa digitalização da informação podem ser visualizados no diagrama funcional, abaixo:

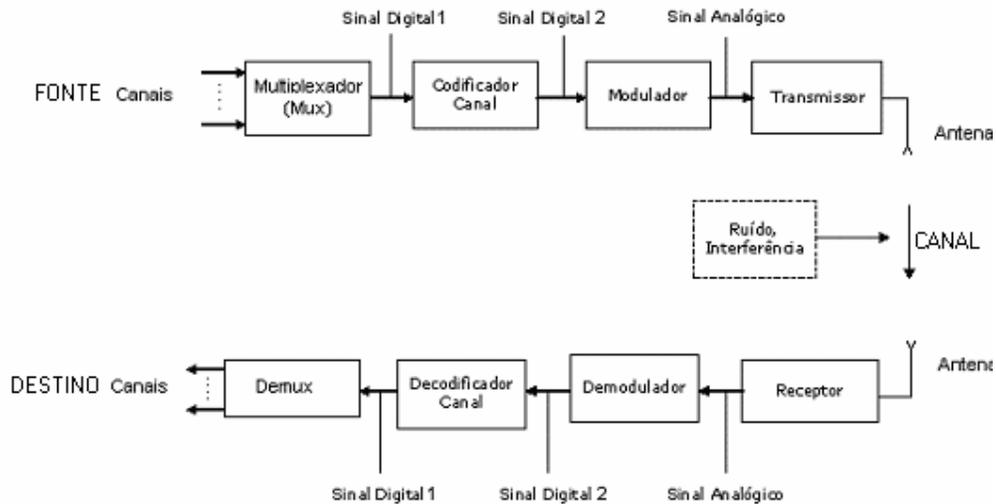


Figura 6 – Diagrama funcional do enlace digital ponto a ponto.

Como pode ser visto acima o sinal transmitido no canal de comunicações encontra-se na forma analógica, porém, entre a fonte e o destino existe um processo de digitalização dos sinais envolvidos.

O Sinal Digital 1 em um enlace rádio digital assume normalmente um dos formatos PDH (E1 a E4) ou SDH (STM1) apresentados na tabela a seguir.

Hierarquia Digital	Taxa de Bits		Capacidade de Multiplexação de Canais
	Notação Usual	Valor Exato	
E1	2 Mbps	2.048 kbit/s	30 canais de 64 kbit/s
E2	8 Mbps	8.448 kbit/s	4 E1
E3	34 Mbps	34.368 kbit/s	16 E1
E4	140 Mbps	139.264 kbit/s	64 E1 ou 4 E3
STM-1	155 Mbps	155.520 kbit/s	63 E1 ou 3 E3

Tabela 1 – Tabela de Hierarquia Digital

O multiplexador na entrada permite o transporte de canais com hierarquia (taxas de bits) menor que a do Sinal Digital 1 conforme indicado na tabela.

O sinal Digital 1 é codificado gerando o sinal Digital 2. A finalidade desta codificação (codificação de canal) é melhorar a confiabilidade com que a informação é transmitida, permitindo que erros na transmissão sejam detectados e corrigidos. Podem ser utilizados dois tipos de códigos:

- Códigos de linha são os códigos referentes ao formato do sinal digital. Eles são utilizados na transmissão de um sinal digital de modo a eliminar uma longa seqüência de 0's ou 1's reduzindo a probabilidade de erro na transmissão. Exemplos: AMI, HDB-3 e CMI.
- Códigos para detecção e correção de erro como os FEC (*Forward Error Correction*).

Em seguida, o Sinal Digital 2 é então modulado sendo gerado desta forma um sinal analógico que pode ser transmitido na freqüência de operação do rádio.

A principal função da modulação é permitir que estes sinais de banda básica sejam transmitidos em freqüências mais altas possibilitando a ocupação do espectro eletromagnético. Os principais tipos de modulação são a Amplitude *Shift Keying* (ASK), *Frequency Shift Keying* (FSK), *Phase Shift Keying* (PSK) e a *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM).

Hoje em dia, os enlaces rádio digital estão utilizando modulações cada vez mais eficientes nas quais um símbolo representa mais de 1 bit. Estes esquemas de modulação permitem aumentar a taxa de bits transmitida em uma banda de freqüências, mas tornam a transmissão mais sensível a ruídos e interferência exigindo assim uma melhor codificação de canais além de outros cuidados no projeto e implantação do enlace.

O sinal modulado é amplificado e transmitido sendo recebido na outra ponta onde é demodulado e o sinal digital original é recuperado.

No próximo sub-capítulo falaremos sobre o enlace, ou seja, a propagação entre transmissor e receptor, onde sinal é atenuado e está sujeito a ruído e interferências.

2.5.2. Enlace ponto a ponto e multi-ponto

No dimensionamento de um enlace de rádio o objetivo é garantir que o sinal digital original que transporta a informação possa ser regenerado na outra ponta com uma taxa de erros aceitável. Para que isto ocorra a relação de potência entre a portadora e o ruído (C/N) na recepção tem que ser maior que um valor mínimo especificado. Este valor é função da modulação e mecanismos de codificação utilizados no enlace.

A potência do transmissor e das antenas deve ser dimensionadas de modo a compensar as perdas na propagação e outras referentes à polarização cruzada e atenuação nos conectores, cabos coaxiais ou guias de ondas.

É necessário também incluir uma margem de segurança para fazer frente a sinais interferentes próximos a banda de frequências utilizada pelo enlace. Estes sinais podem aumentar o nível de ruído no receptor e por consequência deteriora a relação portadora ruído.

Em um enlace rádio o sinal é transmitido pela antena transmissora e propaga-se na forma de ondas de rádio (ondas eletromagnéticas) até a antena receptora. Ao se propagar de uma antena até a outra o sinal é atenuado estando sujeito às seguintes perdas:

1. Perdas no espaço livre: Apenas parte da energia transmitida através das ondas eletromagnéticas é captada pela antena receptora. Esta energia é tanto menor quanto maior a frequência e a distância. Esta perda, denominada perda no espaço livre é expressa em dB pela seguinte fórmula.

$$\text{Perda no espaço livre (L)} = 32,5 + 20\log(d) + 20\log(f) \quad (2.5)$$

Onde, d é a distância em km e f a frequência em MHz.

2. Desvanecimento: Ao se propagar as ondas de rádio estão sujeitas a reflexões no solo e na atmosfera que provocam alterações na sua amplitude e caminho percorrido ocasionando variações na potência do sinal recebido. Estas variações são chamadas de desvanecimento (fading). O desvanecimento pode ser causado também por obstáculos na linha de visada direta, ou por atenuação devido a chuvas.
3. Disponibilidade do enlace: Compensar todas as perdas no enlace devido a desvanecimento pode levar a utilização de margens muito grandes encarecendo ou até inviabilizando o enlace. Em certos casos, principalmente em frequências mais altas onde a atenuação devida a chuvas é maior, procura-se especificar uma margem que garanta uma alta disponibilidade para o enlace, admitindo-se, no

entanto, que ele fique indisponível por um certo período de tempo. Por exemplo, um enlace com uma disponibilidade anual 99,995% ficará indisponível 26,28 minutos no ano. Em frequências acima de 10 GHz e em regiões de clima tropical como o Brasil a atenuação por chuva é um fator relevante no dimensionamento de enlaces de rádio. Este dimensionamento é feito utilizando modelos de estimativa de chuva da UIT ou outros desenvolvidos no Brasil.

É importante lembrar que a disponibilidade do sistema como um todo é menor que a disponibilidade do enlace, pois deve-se levar em consideração as falhas nos equipamentos que o compõem.

A topologia ponto a ponto tem com objetivo atender duas grandes demandas:

- Um escritório central ou matriz de uma empresa, a partir do qual se interliga outro escritório na mesma região (filiais);
- Um Ponto de Presença da rede multi-serviços de uma operadora de serviços de telecomunicações, a partir do qual se atende um usuário de uma região.

Na configuração Ponto-Multiponto o conceito é atender vários usuários simultaneamente a partir de um único ponto chamado de estação Master. Este ponto é estrategicamente posicionado para cobrir a área de interesse de atendimento. Ele pode ser:

- Um escritório central ou matriz de uma empresa, a partir do qual se interligam outros escritórios na mesma região (filiais);
- Um Ponto de Presença da rede multisserviços de uma operadora de serviços de telecomunicações, a partir do qual se atendem vários usuários de uma região.

Na arquitetura Ponto-Multiponto, são formadas células que podem utilizar antenas tipo omnidirecional (360°) ou diretiva setorial. O ângulo de cobertura da antena diretiva pode ser de 30°, 60°, 90° ou 120° dependendo da área em questão. Estas células podem ser configuradas para operar com várias antenas posicionadas seqüencialmente formando setores consecutivos que proporcionam uma grande área de cobertura.

Dependendo da demanda existente numa região específica é possível instalar várias antenas (cada uma com seu rádio) com o objetivo de aumentar a largura de faixa. Nesses casos, onde a estação *Master* possui vários rádios operando simultaneamente, é conveniente realizar um sincronismo entre os rádios para evitar interferências do próprio sistema.

Assim como na arquitetura Ponto a Ponto, podem ser oferecidos os serviços de interligação de redes corporativas ou de acesso a Internet utilizando os rádios *spread spectrum* com suas funcionalidades básicas.

O compartilhamento de banda do rádio para mais de um usuário ou uso de mais de um rádio por setor da célula pode demandar o uso de equipamentos do tipo *Switch's* ou *IP Mux's* (nos pontos dos usuários), além de roteadores no Ponto de Presença (estação *Master*) da operadora de serviços de telecomunicações. Também neste caso estes equipamentos permitem oferecer a funcionalidade de segurança entre as redes dos diversos usuários.

3

Redes de Comunicação

3.1.

SDH – Hierarquia Digital Síncrona

A padronização da Hierarquia Digital Síncrona – SDH sinaliza o começo da revolução nas redes de comunicações em todo o mundo. A SDH, quando empregada na sua plenitude, deverá trazer benefícios tanto aos usuários finais, quanto aos operadores de redes e equipamentos manufaturados.

Essa padronização representa um avanço em tecnologia que pode ser comparado em escala ao que ocorreu com a Transmissão por Modulação por Pulsos Codificados (PCM).

Atualmente, os usuários finais, particularmente os de negócios, tornam-se cada vez mais dependentes de comunicações. Por isso, tem havido uma explosão na demanda de serviços de telecomunicações mais sofisticados. Serviços como videoconferência, acesso a bases remotas de dados, multimídia, requerem redes cada vez mais flexíveis com uma largura de faixa virtualmente ilimitada.

A PDH evoluiu em resposta à demanda por telefonia mais eficiente e com maior banda passante. Já a SDH utiliza essencialmente a mesma fibra óptica da PDH, porém, pode aumentar significativamente a largura de faixa disponível ao reduzir a quantidade de equipamentos presentes na rede. Traz, além disso, maior flexibilidade à gerência de rede para a tomada de decisões. A SDH, por ser uma rede de transporte de dados digitais, foi concebida desde a sua padronização pelo ITU-T para operar com entrada e saída de dados PDH.

No momento que o equipamento síncrono encontra-se instalado na rede, os benefícios tornam-se visíveis, como economia de custos associada à redução na quantidade de elementos de redes, aumento da eficiência e da confiabilidade. O resultado imediato em decorrência do aumento da confiabilidade é a redução do número de equipamentos de reposição em estoque.

A seguir, os seguintes pontos são discutidos: Estrutura de multiplexação em redes SDH e Taxas de transmissão de dados.

3.1.1. Estrutura de multiplexação em redes SDH

A multiplexação em redes SDH pode ser ilustrada por meio da figura abaixo. Esta estrutura de multiplexação foi padronizada pelo ITU-T.

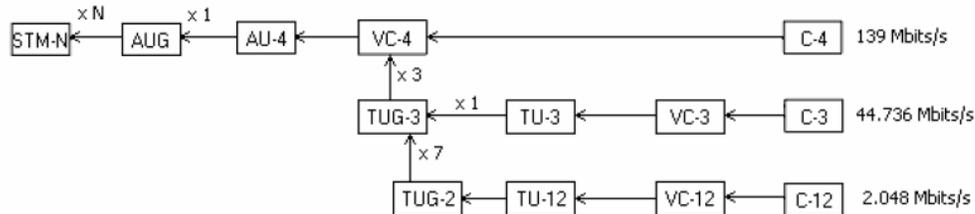


Figura 7 – Estrutura de multiplexação da SDH

A descrição de cada bloco componente da estrutura mostrada na figura 7 é feita a seguir:

1. Contêiner (C): é uma estrutura de informação responsável pelo transporte do sinal tributário enquanto este permanece na rede SDH [8]. O mapeamento de diferentes tributários em contêineres é mostrado na tabela abaixo.

Contêiner	Tributário mapeado (Mbits/s)
C-4	139.264
C-3	44.736
C-12	2.048

Tabela 2 – Mapeamento de tributários nos contêineres

2. Contêiner Virtual (VC): é formado por uma estrutura de informação composta por uma carga útil (*payload*) mais o *overhead* de via (POH), o qual permite a monitorização do percurso realizado pelo sinal ao longo de um trajeto [9]. Nas tabelas a seguir, temos as possíveis combinações de VCs.

LO VC	T (μs)	Payload
VC-3	125	C-3
VC-12	500	C-12

Tabela 3 – Composição dos contêineres virtuais de ordem inferior (LO VCs)

HO VC	T (μs)	Payload
VC-4	125	C-4 e/ou 3 TUG-3

Tabela 4 – Composição dos contêineres virtuais de ordem superior (HO VCs)

Nas tabelas acima, LO VC (VC-12, VC-3) é o contêiner virtual de ordem inferior; HO VC é o contêiner virtual de ordem superior; T é o período de montagem do contêiner virtual e *payload* é a matriz contendo os dados úteis a serem transmitidos.

- Unidade de Tributário (TU): é uma estrutura de informação que faz a adaptação entre a camada de via de ordem inferior e a camada de via de ordem superior. É formada por um *payload* de informação (LO VC) e um ponteiro de TU que indica quantos bytes existem entre o início do quadro do *payload* em relação ao início do Virtual Contêiner de Ordem Superior (HO VC)

Unidade de Tributário	Payload
TU-3	VC-3
TU-12	VC-12

Tabela 5 – Conteúdo da unidade de Tributário (TU)

- Grupo de Unidade Tributário (TUG): é uma estrutura de informação formada pelo entrelaçamento byte a byte de TUs [8].

Grupo de Unidade de Tributário	Unidade de Tributário
TUG-3	1*TU-3
TUG-2	3*TU-12

Tabela 6 – Conteúdo do Grupo de Unidades de Tributário (TUG)

- Unidade Administrativa (AU): é uma estrutura de informação que provê a adaptação entre a camada de via de ordem superior e a camada da seção multiplexadora. É formada por um *payload* de informação (HO VC) e um ponteiro de AU que indica quantos bytes existem entre o início do quadro do *payload* em relação ao início do quadro da seção multiplexadora [8].

Unidade Administrativa	<i>Payload</i>
AU-4	VC-4

Tabela 7 – Conteúdo da Unidade Administrativa (AU)

6. Grupo de Unidades Administrativas (AUG): faz o entrelaçamento dos bytes das unidades administrativas (AUs) para a composição de uma estrutura de informação denominada AUG [8].

Grupo de Unidades Administrativas	Formato
AUG	1*AU-4

Tabela 8 – Conteúdo do Grupo de Unidades Administrativas (AUG)

Na saída deste bloco, temos um sinal STM-N composto por um *payload* acrescido de um Overhead de Seção (SOH) para a monitoração da trajetória do sinal presente na camada de seção multiplexadora [8].

3.1.2.

Taxas de transmissão de dados

Os dados são transmitidos numa rede SDH em quatro níveis principais, conforme mostrado na tabela abaixo. O nível STM-1 é definido como estrutura básica de transporte de informações. As taxas de bits dos níveis superiores constituem-se exclusivamente em múltiplos inteiros dessa velocidade [8].

Níveis de sinais	Taxas brutas (Mbits/s)
STM-1	155.520
STM-4	622.080
STM-16	2.488.320
STM-64	9.953.280

Tabela 9 – Nível do SDH

Além destes níveis, há ainda uma estrutura denominada STM-0, com taxa bruta de 51.840 Mbits/s, utilizada para sistemas de satélite e rádio enlace, a qual é desconsiderada como nível hierárquico [8, 9].

3.2. Topologias

Predominantemente, as topologias mais adotadas para as redes de transmissão, mencionadas nos sub-capítulos anteriores, serão apresentadas a seguir.

Tanto a rede SDH quanto a PDH, possuem os seguintes tipos de topologias:

- Ponto-a-ponto: 2 equipamentos terminais interligados por um único meio físico;
- Barramento: 3 ou mais equipamentos interligados por um único meio físico, sendo 2 equipamentos terminais e os demais equipamentos ADM;
- Anel: 3 ou mais equipamentos ADM interligados através de um único meio físico.

As figuras, abaixo, representam os tipos existentes e suas variações:

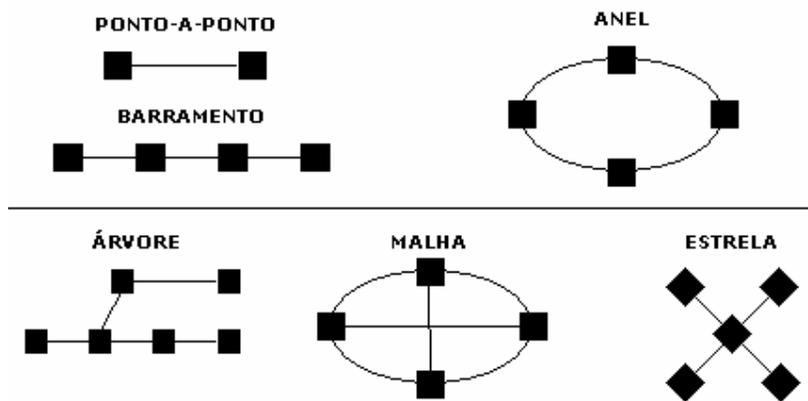


Figura 8 – Tipos de topologias e variações

Além disso, as topologias podem ser classificadas como:

- Física: visão da rede a partir da sua topologia física, ou seja, considerando o meio físico utilizado e os seus equipamentos;
- Lógica: visão da rede a partir da interligação dos equipamentos sem considerar a topologia da rede física.

Na maioria dos casos, as visões de rede física e lógica são as mesmas. Entretanto, em algumas situações as restrições impostas para a construção da rede física podem levar os projetistas a elaborar um projeto onde, embora a rede tenha uma configuração ponto-a-ponto ou barramento, a rede lógica possa ter a configuração em anel.

4

História dos estudos de transmissão óptica

Em relação aos problemas apresentados nessa dissertação, vale salientar que após investigação não foram encontrados estudos que abordassem esses temas. Segue um conjunto de trabalhos relacionados ao tema dessa dissertação.

Transmissões ópticas iniciaram-se antes da década de 70, quando fibras com baixa atenuação foram produzidas e semicondutores foram inventados [11]. Taxas de transmissão e distâncias cresceram numa velocidade exponencial até o final da década de 80, e o primeiro cabo de fibra óptica através do Atlântico, usando repetidores eletrônicos, foi implantado em 1988.

O interesse em redes ópticas iniciou-se no meio da década de 80, e o primeiro protótipo em laboratório, Lambdanet, surgiu em 1990 [12]. A primeira rede desenvolvida foi Rainbow-1(1991), e os primeiros produtos WDM surgiram em 1995. Os avanços tecnológicos mais importantes da última década foram: desenvolvimento de todos produtos ópticos com mais canais por fibra, mais bitrate por canal, intervalos de transmissão mais longos, novos tipos de fibra e amplificadores com baixo custo. Estudos sobre arquitetura e protocolos de rede óptica surgiram em 1990.

4.1.1. Estudos sobre Redes Ópticas

Os estudos sobre redes ópticas são classificados de acordo com a escala da rede considerada. A figura abaixo demonstra todos tópicos estudados no campo das redes ópticas.

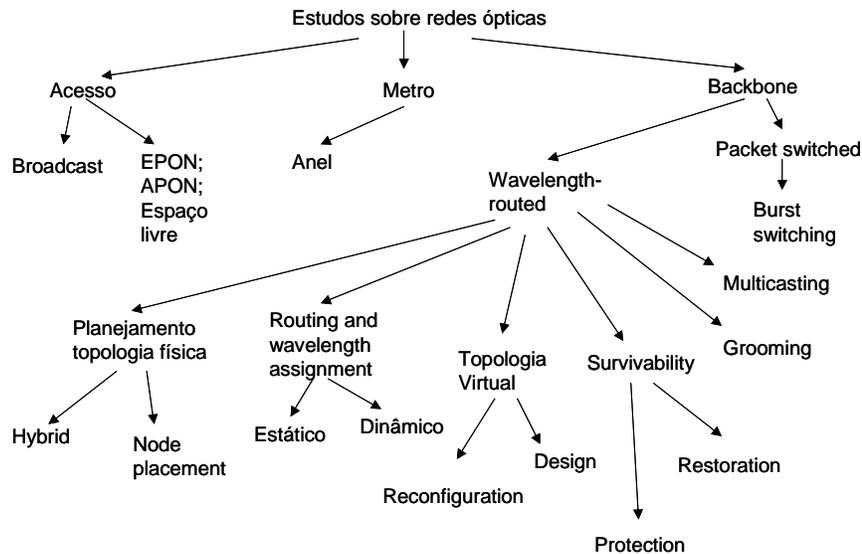


Figura 9 – Classificação dos estudos sobre rede óptica

Os primeiros estudos sobre redes de acesso iniciaram-se na década de 80. Os sistemas *single-hop* e *multi-hop* foram desenvolvidos e diferentes arquiteturas de redes foram propostas. Estudos sobre as diferentes redes de meio óptico são apresentados em [13, 14]. Estruturas topológicas regulares e irregulares incluindo *shufflenet*, *deBuijn*, *Manhattan Street*, são examinadas nas formulações dos estudos [15, 16, 17, 18, 19, 20].

Existem três tecnologias ópticas que são candidatas a próxima geração de redes de acesso: Topologias ponto-a-ponto, redes ópticas passivas e redes ópticas no espaço-livre. Em topologias ponto-a-ponto *links* fibrados são independentemente conectados aos centros de controle. Esta arquitetura é simples, mas muito dispendiosa em relação às estruturas existentes. Uma alternativa é a utilização da topologia estrela onde uma sub-estação é colocada perto dos clientes para multiplexar os sinais entre os clientes e os centros de controle. Redes ópticas passivas (ROPs) substituem sub-estações com componentes ópticos passivos por divisores ópticos. Todas topologias são adequadas com ROPs incluindo *tree-and-branch*, *ring* e *bus* [21, 22]. A terceira opção constitui uso de infravermelho para transmitir informação por topologias ponto-a-ponto. Uma conexão óptica pode ser estabelecida pelo ar através de *lasers* posicionados e apontados para receptores [23, 24].

Redes metropolitanas interconectam-se com redes de acesso através dos *backbones* de serviços dos provedores, e suas infra-estruturas físicas são formadas por anéis baseado em SONET/SDH. Anéis SONET utilizam canais

simples com técnicas TDM. Com TDM, os grandes comprimentos de banda dos canais são divididos em pequenos comprimentos de banda de sub-canais e cada sub-canal pode transportar dados em pequenas taxas diferentes. Com surgimento da tecnologia WDM, o próximo passo é a migração do único canal do anel SONET para múltiplos canais do anel WDM/SONET, onde cada comprimento de onda pode operar similarmente em um canal SONET TDM. Entretanto, a solução para SONET necessita de um multiplexador *add/drop* (ADM) para cada comprimento de onda em cada nó, aumentando o número total de ADMs na rede W vezes, onde W é o número de comprimento de ondas. O número total de ADMs pode ser cuidadosamente reduzido empacotando-se as conexões dos pequenos comprimentos de banda em comprimentos de onda. O empacotamento de *streams* de tráfego de baixa velocidade em *streams* de tráfego de alta velocidade para minimizar os recursos usados (chamado de *tráfego grooming*), é um tópico de estudos que tem recebido muita atenção [25, 26, 27, 28, 29, 30].

4.1.2. Estudos sobre redes ópticas Wide-area

Redes WDM *Wide-area* foram bastante estudadas na última década, e muitos algoritmos e métodos foram propostos para resolver problemas de planejamento, roteamento, alocação de recursos, reconfiguração, *survivability*, *grooming*, *multicasting* e *packet switching*. Os estudos relatados para roteamento e *wavelength assignment* (RWA) e topologias virtuais são examinados em detalhe no próximo sub-capítulo.

As propriedades da camada física das redes afetam o planejamento em termos de custo, eficiência e *survivability*. Muitos estudos consideram o projeto da camada física com diferentes aspectos: planejamento topológico [31], localidade do nó [32], roteamento baseado nas propriedades e falhas na camada física [33] e roteamento baseado no funilamento [34].

Em redes WDM a falha do elemento rede resulta em falhas em todos os canais ópticos, acarretando em perda de dados. Existem muitas abordagens que garantem a sobrevivência da rede contra falhas nos links [35]. Arquiteturas de rede *survivable* são baseadas em reservar facilidades backup chamado *protection* [36], ou descobrir facilidades disponíveis no momento da falha chamado *restoration* [37]. A proteção dos serviços para restauração utiliza facilidades da rede pré-computadas e reservadas. Na restauração é usada a

capacidade disponível para manter a rede em funcionamento em caso de falhas. Projetos de redes ópticas *survivable* é objeto principal dos estudos [38, 39, 40, 41, 42, 43, 34].

Os problemas de tráfego *grooming* são estudados para anéis de redes WDM/SONET com o objetivo de minimizar o custo total da rede mensurado em termos do número de ADMs SONET. Hoje em dia, os *backbones* ópticos são evoluções das interconexões dos anéis de topologias em malha, e conseqüentemente, tráfego *grooming* em redes de malha WDM se tornaram problemas importantes [44, 45, 46, 47]. Para suportar tráfego *grooming*, cada nó WDM da rede de malha é equipado com OXC que é capaz de comutar o tráfego.

No problema estático de *grooming*, toda conexão solicita um comprimento de banda diferente do conhecido *a priori*. No problema dinâmico de *grooming*, a conexão solicita que as informações sejam aleatórias, aguarda por um tempo finito, provisiona o pedido em tempo real e desconecta quando acaba. O problema de *grooming* em redes *wide-area* é interessante e cada vez mais atrai novos estudos [48, 49, 50].

Outro problema interessante é prover conexões *multicast* em redes ópticas. A *light-tree* [51] é uma generalização ponto-multiponto de *trail* e fornece uma comunicação *single-hop* entre fonte e um conjunto de destinatário. Para realizar a *multicast-capable* WDM em redes *wide-area*, arquiteturas *multicast-capable* comutada e algoritmos efetivos de roteamento são desenvolvidos em [52, 53].

Uma alternativa para redes com roteamento de comprimento de onda é comutação por pacote óptico. A tecnologia de comutação por pacote óptico (CPO) está num estágio inicial, e atrai um número crescente de pesquisadores. Na verdade CPO pode se tornar um candidato viável porque possui alta velocidade, comutação precisa, flexibilidade e é capaz de usar equipamentos econômicos [54, 55, 56, 57, 58]. Uma solução intermediária entre comutação de circuito e comutação de pacotes é a quebra por comutação óptica, propostas em [59, 60].

4.1.3.

Estudos sobre planejamento e reconfiguração de topologia virtual

Os principais estudos relacionados a esse problema da tese, podem ser categorizados em três tipos:

- Routing and wavelength assignment (RWA);
- Planejamento da topologia virtual;
- Reconfiguração da topologia virtual.

Existem dois tipos diferentes de problemas RWA, que dependem da natureza do tráfego na rede: estático e dinâmico. Tipicamente, as conexões que ocorrem na rede são: estática, onde a matriz de tráfego é dada e não há alteração nas conexões depois de feitas, ou dinâmica, onde a conexão tem início aleatório no tempo, e ocorrem uma por uma. O problema RWA estático pode ser matematicamente formulado como um problema de otimização (programação linear inteira – PLI) [61, 62, 63]. Resolver esse problema é complexo, pois os espaços nas matrizes crescem em função dos parâmetros da rede, como por exemplo, o número de nós e o número de comprimentos de onda. Na verdade, RWA é um problema NP-completo. Normalmente, este problema é decomposto em dois sub-problemas: roteamento e *wavelength assignment*. Esta técnica implica em soluções sub-ótimas, porém simplifica a estrutura do problema e os algoritmos utilizados.

No problema RWA dinâmico, conexão solicita que a chegada das informações seja pontual e os *trails* são configurados dinamicamente, de acordo com a disponibilidade atual de facilidades na rede. Similarmente, ao caso estático, dois subproblemas podem ser separadamente considerados.

Todos os estudos consideram o problema RWA, para obter o melhor desempenho [64, 65, 66]. Uma revisão dos estudos sobre o problema RWA pode ser encontrada em [67].

O planejamento da topologia virtual é um problema de seleção e configuração de grupos de *trails*, quando a matriz de tráfego é conhecida. O objetivo é projetar a maximização do tráfego, balanceando os *trails* carregados, minimizando as facilidades da rede. Estes problemas contêm alguns subproblemas [68]:

1. Determinar a melhor topologia virtual, isto é, o melhor conjunto de *trails*;
2. Rotear os *trails* sobre a topologia virtual;
3. Designar os comprimentos de onda ótimos para os *trails*;
4. Rotear o tráfego de pacotes sobre a topologia virtual.

Estes subproblemas não são independentes e por conseqüência, solucioná-los independentemente fornecerá sub-soluções ótimas.

Planejar a topologia virtual pode ser formulado como *Mixed-Integer Linear Program* (MILP) [69, 70, 71, 72, 73]. Resolver essas formulações não é viável para redes com um número considerável de nós, e assim foram propostos inúmeros algoritmos heurísticos. Em [69], um algoritmo iterativo de dois passos é apresentado. O objetivo da formulação em [70] é a minimização de congestionamento na rede enquanto restringe o atraso médio entre a fonte e o destino. Outra formulação ILP é apresentada em [71] que considera várias restrições de conectividade físicas. Em [72], é dada uma formulação ILP para planejamento da topologia virtual completa com o objetivo de minimizar a distância média dos saltos dos pacotes. Os autores propõem o método *branch-and-bound* para prover soluções de alta qualidade e terminar a otimização utilizando as primeiras iterações. Em [73], uma formulação ILP generalizada é apresentada considerando um número máximo de saltos por *trail*, múltiplos *links* lógicos na topologia virtual, múltiplos *links* físicos na topologia física, e restrições simétricas. Os autores, também, propõem um método para planejamento da topologia virtual baseado na relaxação do problema ILP. Um estudo comparativo sobre algoritmos de planejamento de topologia virtual é apresentado em [74, 75].

A capacidade de reconfigurar a camada óptica é uma das mais valiosas características das redes WDM. Esta capacidade garante flexibilidade contra as condições de mudanças da rede, como tráfego intenso e falha no nó ou link. Rearranjar ou reconfigurar a topologia virtual significa em projetar novas conexões em função das condições das redes e dos critérios pré-estabelecidos. Um ponto importante é que essa nova topologia deve ser a mais próxima possível da previamente existente, pois assim pode-se minimizar as interrupções nos tráfegos roteados.

Estudos sobre reconfiguração da topologia virtual, geralmente, possuem dois passos. No primeiro preocupa-se no projeto da nova topologia considerando todas informações de entrada incluindo a nova matriz de tráfego, a atual topologia virtual, e objetivos primários do projeto. O segundo passo é a fase de transição onde os comutadores ópticos, transmissores e receptores são reconfigurados e a topologia virtual é mudada.

Uma formulação ILP é usada para resolver o problema de reconfiguração em [72]. O método propõe uma nova topologia virtual a partir da existente, respeitando as mudanças do tráfego. Este método minimiza o número de comutações durante o período de transição e o número de *trails* parados. Uma modificação neste método é proposta em [76] onde o ILP otimiza várias métricas, número de saltos, número de *links* físicos, número de *trails* e várias

combinações dessas variáveis. Ambos os métodos estudados são aplicados apenas em redes pequenas devido à sua complexidade.

Um método *online* de reconfiguração é estudado em [86]. Os autores propõem um método heurístico baseado em dois estágios de aproximação. No primeiro as alterações na topologia virtuais são feitas através de reconfigurações que tem o objetivo de minimizar o valor da função objetivo. Nesse estágio, o número de mudanças é limitado por um valor pré-definido. No segundo estágio, a otimização é feita com o objetivo de trazer o valor da função objeto mais próximo do ponto ótimo.

Como pode ser visto, reconfigurar a rede é um problema complexo e muito dos métodos propostos são usados apenas em redes de tamanho pequeno. Para grandes redes, algoritmos simples e eficientes são necessários para prover reconfiguração *online* da camada óptica.

4.1.4.

Estudos sobre planejamento de redes de transmissão

Com o objetivo de apresentar e direcionar os estudos apresentados nessa tese que servissem de apoio para a elaboração de modelos matemáticos consistentes, foram pesquisados artigos e trabalhos que são discutidos a seguir.

A. Lardiés, A. Aguilar et al. [77] desenvolveram um programa para avaliar e dimensionar a um custo mínimo redes ópticas SDH, sendo aplicado à rede de transporte européia, ou seja, redes com 19 nós e 39 enlaces interconectados aos *backbones* de comunicações das principais cidades européias. A metodologia para desenvolvimento da rede é, simultaneamente, feita em ambas as camadas (óptica / elétrica) para a obtenção das melhores soluções de redes em termos de custo, flexibilidade e disponibilidade. A razão para tal é que os sinais transportados na SDH vêm de camadas ATM e PDH e passam por uma camada óptica (utilizando WDM) para que sejam montados em um formato síncrono. Os dados de entrada dizem respeito: à topologia da rede para formação de nós e enlaces; à formação das matrizes de conexões ponto-ponto com diferentes tributários (2, 34, 140, 155 Mbits/s); aos equipamentos ópticos e SDH (DXC, ADM, OXC, OADM, terminais de linha, repetidores, amplificadores ópticos); aos requisitos para o desenvolvimento de redes; ao esquema de roteamento; ao mecanismo de proteção; à disponibilidade da topologia de rede. Os dados de saída são: roteamento dos dados e dimensionamento da rede para cada camada. A composição do nó de cada camada é decidida em função da

topologia da rede, das demandas dos circuitos e da proteção requerida. Os nós com funcionalidade óptica são determinados e o roteamento de cada camada é estabelecido através de cada camada óptica ou camada elétrica ou a combinação de ambas as camadas. Quando as demandas são roteadas e os elementos de cada camada são dimensionados, a análise do desempenho é feita para comparar diferentes soluções de rede. Neste ponto, o planejador tem informações suficientes para desenvolver alternativas factíveis a rede.

G. Carrasco, A. Mata, I. Garrido et al. [78], apresentam metodologias para o desenvolvimento de redes em termos de localização e dimensionamento dos nós da rede através da utilização de conexões funcionais. Os dados de entrada dizem respeito: à demanda na estação provedora de serviços (contém restrições quanto às capacidades e características dos equipamentos na estação); à topologia empregada na rede; ao conjunto potenciais das unidades de redes (cada unidade de rede está associada a um custo); à permissão de obterem-se configurações de unidades de redes (cada configuração a um custo de instalação do equipamento). As restrições são: máxima distância de alcance das informações a um ponto de distribuição de dados (estações); regras de dimensionamento de pontos de distribuição de dados. Os dados de saída são: localização e dimensionamento físico de cada ponto de distribuição de dados; quantidade ótima de equipamentos em cada estação. O problema é solucionado em duas etapas. Na primeira, uma solução inicial é obtida para a localização geográfica dos pontos de distribuição de dados. Na segunda, é minimizado o número total de equipamentos presentes num ponto de distribuição de dados. Este trabalho fornece informações importantes para o desenvolvimento ótimo de redes metropolitanas (MANs) de caráter geral. São elas: para o desenvolvimento de um *software* de otimização de redes de comunicações consideram-se restrições nas capacidades inerentes dos equipamentos das estações; propor no nível de *software* a análise de diferentes topologias de redes (anel, estrela e malha).

E. Thibault, L. O. Barbosa, J. M. Thizy. et al. [79], desenvolveram um modelo completo para otimizar o projeto de redes metropolitanas (MANs) através da minimização do custo da rede utilizando múltiplas alternativas (minimização da quantidade total de fluxo normalizado na rede, seleção de caminhos para os dados utilizando diferentes protocolos de roteamento para redes metropolitanas), restrições para desempenho e sobrevivência, por meio de Programação Linear. A função objetivo é multi-critério, sendo responsável pela minimização do custo da solução desenvolvida bem como da minimização da quantidade total de fluxo

normalizando na rede. As restrições impostas ao problema foram: manutenção de fluxos dos nós sob condições normais e de falhas; restrições nas capacidades dos enlaces sob condições normais e de falhas. Este documento é importante sob o aspecto de mostrar ao leitor interessado um modelo de projeto otimizado de um *backbone* e a partir deste, motivá-lo para adaptar as variáveis empregadas em MANs à tecnologia SDH

M. Minoux et al. [80], desenvolveram um trabalho a respeito do tráfego entre as estações origem e destino a um custo mínimo aplicado as MANs, LANs e ISDN. É feito um estudo a respeito de aplicações das diversas tecnologias e descrições de técnicas para o desenvolvimento de uma topologia de rede ótima.

. Berry, B. Murtagh, G. McMahon, S. Sugden et al. [81], propuseram a utilização do Algoritmo Genético (GA) juntamente com Programação Linear (LP) para solução do problema de síntese de sistemas de comunicações. Relatam que os problemas de sintetizar redes são conhecidos como NP-completo e a natureza combinatória do GA são indicadas como uma nova forma de substituir as programações matemáticas clássicas. Ao ser estabelecida uma topologia de rede pelo GA, pode-se otimizar os fluxos de rede satisfazendo as especificações das demandas nas estações origem e destino. É considerando um conjunto de nós orientados e o problema primário é fazer a junção desses nós de maneira eficiente. A LP foi utilizada devido à necessidade de existirem múltiplas alternativas de caminhos de tráfegos e não um único caminho para os dados. Cada solução é gerada em dois estágios. O primeiro constrói a topologia da rede usando GA. O segundo otimiza os fluxos na rede levando em consideração as restrições de fluxos nos nós e fibras ópticas. Métodos heurísticos foram utilizados como forma de investigar as possíveis soluções. Propõe-se a adição de redundância para garantir a sobrevivência do sistema, ou seja, caso um enlace falhe, existirá a possibilidade de conexão entre outros nós interligando as estações. O desenvolvimento do problema consiste em atender todo o tráfego requerido a custo mínimo. As informações requeridas para a formulação do problema são as matrizes de demanda e custo entre cada enlace (arco). Como conclusões, os autores sublinham a eficiência da metodologia descrita para redes médias e a vantagem da obtenção de boas soluções de forma eficiente. A metodologia descrita no artigo é interessante sob o ponto de vista de como acoplar o GA e LP.

Em [82], é proposta uma formulação fundamentada no tráfego requerido entre as estações origem e destino, bem como o custo por unidade de fluxo em cada enlace. Combina-se GA e LP para formar um método computacional

poderoso para encontrar boas soluções em problemas de síntese de redes. Discute-se a vantagem da utilização do GA como uma ferramenta poderosa no sentido de fazer múltiplos ajustes na rede para cada iteração, diferente de *métodos de decomposição e reconexões ótimas* [83] que permitem somente um simples ajuste nos enlaces. As restrições apresentadas são: largura de banda do enlace, capacidade dos nós limitados ao teto operacional, capacidades dos enlaces não excedendo um limite operacional, limite global de saltos para todas as rotas.

5

Problema de planejamento de novas redes de telecomunicações

O Problema de Planejamento de Novas Redes de Telecomunicações (PPNRT) consiste em atender um conjunto de clientes com demandas diferentes que devem ser conectados ao conjunto de pontos de presença (*PoPs*) das operadoras com capacidades distintas de fornecimento.

Esse problema surgiu com a necessidade de projetar e construir a melhor topologia tanto em relação à rede de acesso (*last mile*) quanto a referente ao *backbone*. Através de licitações, concorrências e leilões, cada vez mais, as operadoras precisam agilizar e automatizar os processos de elaboração de projetos de novas redes. Além disso, a busca pela redução de custos de investimento exige uma qualidade maior nos projetos.

Outra motivação é a liberdade de poder construir a rede em qualquer parte do território brasileiro, não ficando apenas limitada pela sua área da concessão. Alguns problemas não serão considerados na resolução desse problema, por exemplo, limitações no relevo, topologia urbana (posicionamento de prédios, ruas e instalações subterrâneas) e tipo de produto que atende o cliente.

Todo estudo feito no problema PPNRT gira em torno de um levantamento da demanda dos clientes numa região e da capacidade dos *PoPs* existentes. Como já foi dito anteriormente, nessa dissertação serão consideradas três tecnologias como meio de transmissão: fibra óptica, rádio digital e par metálico.

Serão adotadas distâncias euclidianas entre dois pontos e os custos conforme o mercado do ano de 2005. Vale lembrar que grafo que representa esse modelo é direcionado e o conjunto de arestas representa os *links* entre os clientes e os *PoPs*. O objetivo será de minimizar a soma dos custos dos enlaces com os custos de interface, de tal forma que:

- Um caminho de atendimento de um cliente só pode usar tecnologias na ordem fibra óptica, rádio digital e metal. Não é necessário usar todas as tecnologias;

- As três topologias: anéis de fibra, estrelas de rádio e árvores de par metálico;
- As interfaces entre as topologias permitidas são:
 1. Anel de fibra para rádio;
 2. Anel de fibra para metal;
 3. Estrela de rádio para estrela de rádio;
 4. Estrela de rádio para árvore de metal.

A formulação adotada para resolução do PPNRT será *Shortest Path Problem* baseada em *Minimum Cost Flow* para programação linear e inteira. A primeira formulação foi proposta por Dijkstra [84] e em seguida Ford e Fulkerson [85] fizeram uma adaptação para o problema de transporte. Diferentes métodos foram propostos para resolução desse problema, como por exemplo: *successive shortest path* [86, 87, 88]; *out-of-killer algorithm* [89, 90, 91]; *cycle-canceling algorithm* [92, 93, 94, 95] e algoritmo de relaxação [96].

Vale ressaltar algumas dificuldades ao longo da elaboração do modelo, como por exemplo, número de tecnologias, premissa de existir clientes com características distintas de velocidade, tamanho da instância, cada tecnologia possui restrições, características e limitações distintas e por ser um modelo que agrega valores de vários outros modelos.

A seguir, o modelo matemático dessa tese com os seus índices, variáveis, conjuntos e restrições serão apresentados.

5.1. Modelo

5.1.1. Índices

Seguem os índices do modelo:

- i : vértice de origem do arco;
- j : vértice de destino do arco;
- τ : tecnologia;
- γ : cliente;
- ϕ : tecnologia de fibra óptica;
- ρ : tecnologia de rádio digital;

- μ : tecnologia de par metálico;
- P^* : primeiro ponto de presença do conjunto de $PoPs$ disponíveis;
- $numPoP$: número de $PoPs$ na rede.

5.1.2. Conjuntos

Seguem os conjuntos do modelo:

- Γ : conjunto de clientes;
- P : conjunto de pontos de presença (PoP);
- N : conjunto de todos os nós, $N = \Gamma \cup P$;
- PPC : conjunto de clientes que podem se tornar pontos de presença, $PPC \subset \Gamma$;
- T : conjunto de tecnologias para conexão de um cliente a um PoP ou PoP com outro PoP . Nessa dissertação, $T = \{\phi, \rho, \mu\}$, onde o T é composto por fibra óptica, rádio digital e par metálico, respectivamente;
- $\delta^-(i)$: conjunto de todos os pontos que possuem um arco cuja extremidade de destino esteja no ponto i ;
- $\delta^+(i)$: conjunto de todos os pontos que possuem um arco cuja extremidade de origem esteja no ponto i ;
- A : conjunto de arestas do grafo G ;
- v : conjunto de vértices do grafo G .

5.1.3. Dados

Seguem os dados utilizados pelo modelo:

- $dem(\gamma)$: demanda do cliente γ em Mbps (megabits por segundo);
- $custo(i, j, \tau)$: custo de um enlace da tecnologia τ do ponto i ao ponto j . Esse valor compreende os custos de se passar o meio físico, e os custos dos equipamentos que devem ser instalados em i e/ou em j . No caso do rádio, o custo do enlace físico é zero,

mas há o custo da instalação de um par de antenas. No caso de fibra ou metal, ambos os custos existem;

- $cap(\tau)$: capacidade máxima em Mbps de um enlace da tecnologia τ . A capacidade de um enlace de fibra é considerada como infinita;
- $cPPC(i, \tau)$: custo de instalar no *PoP* ou no *PPC* i um equipamento para fazer uma interface para a tecnologia τ ;
- $comp(i, j, \tau)$: comprimento de um enlace da tecnologia τ do nó i ao nó j ;
- ALT_MAX : altura máxima de uma árvore de par metálico;
- $COMP_MAX_FIBRA$: comprimento máximo da fibra;
- $COMP_MAX_RADIO$: comprimento máximo do enlace de rádio.

5.1.4. Variáveis do problema

As seguintes variáveis do problema são binárias:

- x_{ij}^{τ} : variáveis binárias que controlam inclusão ($x_{ij}^{\tau} = 1$) ou não ($x_{ij}^{\tau} = 0$) do arco $\left(\overset{\rightarrow}{i, j} \right)$ que liga o ponto i ao ponto j com a tecnologia τ ;
- q_i^{τ} : variáveis binárias que controlam a instalação no *PoP* ou no *PPC* i do equipamento que fará a interface para tecnologia τ , ou seja, ($q_i^{\tau} = 1$) instala ou ($q_i^{\tau} = 0$) não instala;
- $f_{ij}^{\tau\gamma}$: variáveis binárias que indicam se existe fluxo da tecnologia τ para o cliente γ passando pelo arco $\left(\overset{\rightarrow}{i, j} \right)$, ou seja ($f_{ij}^{\tau\gamma} = 1$) existe o fluxo ou ($f_{ij}^{\tau\gamma} = 0$) não existe.

5.1.5. Formulação

O PPNRT pode ser modelado como um problema de fluxo de redes *multicommodity*. O grafo G é direcionado e o conjunto de aresta representa os *links* entre os clientes e os *PoPs*.

As restrições que serão apresentadas a seguir foram formadas com o objetivo de aproximar ao máximo o modelo teórico com as dificuldades encontradas pelos projetistas no dia a dia. Na apresentação dos resultados computacionais uma comparação considerando as restrições é apresentada considerando o valor do projeto.

Função objetivo:

Nessa dissertação, o modelo busca a redução do custo do projeto, através da minimização do custo de implantação dos *links* entre as estações das operadoras, entre pontos dos clientes, entre pontos dos clientes e estações da operadora e o custo de implantação dos equipamentos para realizar as interfaces entre as tecnologias.

$$MIN \left\{ \sum_{\tau \in T} \sum_{(i,j) \in A} (custo(i,j,\tau) \times x_{ij}^{\tau}) + \sum_{\tau \in T} \sum_{i \in (P \cup PPC)} (cPPC(i,\tau) \times q_i^{\tau}) \right\} \quad (\text{eq 5.1})$$

Restrições:

Com objeto de garantir a existência de fluxo entre os pontos dos problemas, foram elaboradas ou adaptadas as restrições de conservação de fluxo, a seguir.

Em qualquer ponto de passagem, para a qualquer tipo de *link* na rede, a restrição, abaixo, preserva que topo fluxo que entra nesse nó da rede, saia na mesma quantidade.

$$\sum_{\tau \in T} \sum_{j \in \delta^-(i)} f_{ji}^{\tau\gamma} - \sum_{\tau \in T} \sum_{j \in \delta^+(i)} f_{ij}^{\tau\gamma} = 0 \quad \forall \gamma \in \Gamma; \forall i \in V - \{\gamma\} \quad (\text{eq 5.2})$$

Para não permitir que haja fluxo, entre nós de cliente e pontos mais distantes que a tecnologia do *link* permita, foi adaptada restrição abaixo, para que considerasse cada nó de cliente e os nós próximos.

$$\sum_{\tau \in T} \sum_{j \in \delta^-(i)} f_{j\gamma}^{\tau\gamma} - \sum_{\tau \in T} \sum_{j \in \delta^+(i)} f_{ij}^{\tau\gamma} = 0 \quad \forall \gamma \in \Gamma \quad (\text{eq 5.3})$$

As equações abaixo, também são evoluções da restrição de conservação de fluxo, o objetivo é garantir a existência de fluxo entre os *PoPs* da operadora, através da criação de unidades de fluxo para cada cliente a partir de um *PoP* próximo e de que seja criado uma quantidade de unidades de fluxo, em função do número de *PoPs* com origem em um *PoP* referencial.

$$\sum_{j \in P | \delta^-(i)} f_{ji}^{\phi\gamma} - \sum_{j \in P | \delta^+(i)} f_{ij}^{\phi\gamma} = 1 \quad \forall i \in P; \quad \forall \gamma \in P - \{i\} \quad (\text{eq 5.4})$$

$$f_{0j}^{\phi\gamma} = \text{numPoP} \quad j \in P^*; \quad \forall \gamma \in P - \{j\} \quad (\text{eq 5.5})$$

Para existir uma unidade de fluxo para cada cliente do projeto, é proposto, nessa dissertação, a restrição abaixo que garante que todo caminho de atendimento do cliente deve começar no nó 0 (virtual), passar por um *PoP* e terminar no cliente.

$$\sum_{\tau \in T} \sum_{j \in P} f_{0j}^{\tau\gamma} = 1 \quad \forall \gamma \in \Gamma \quad (\text{eq 5.6})$$

Todo caminho de atendimento para cada cliente só vai passar nos enlaces ativados, ou seja, não será permitido fluxo em enlaces que não sejam economicamente viáveis:

$$f_{ij}^{\tau\gamma} \leq x_{ij}^{\tau}; \quad \forall (i, j) \in A; \quad \forall \tau \in T; \quad \forall \gamma \in \Gamma \quad (\text{eq 5.7})$$

Para garantir que não haja tráfego em enlaces ativados que não respeitem a capacidade da tecnologia, a restrição abaixo, permite apenas fluxo em enlaces

onde o somatório das demandas dos clientes seja menor ou igual a capacidade da tecnologia.

$$\sum_{\gamma \in \Gamma} dem(\gamma) \times f_{ij}^{\gamma} \leq cap(\tau); \quad \forall (i, j) \in A; \quad \forall \tau \in T \quad (\text{eq 5.8})$$

Um cliente só pode ser atendido por um único enlace. Ou seja, o cliente só poderá ser abordado por uma tecnologia. Assim, evita-se o desperdício de facilidades e, conseqüentemente, um aumento no preço do projeto.

$$\sum_{\tau \in T} \sum_{j \in \delta^-(i)} x_{ji}^{\tau} = 1 \quad \forall i \in \Gamma \quad (\text{eq 5.9})$$

Pelo menos um *PoP* deve se conectar com outro *PoP* através da tecnologia de fibra. Essa restrição existe para aproximar ainda mais o modelo ao mundo real onde as operadoras criam essas conexões, para atender as demandas dos clientes garantindo segurança e disponibilidade.

$$\sum_{j \in P | \delta^-(i)} x_{ji}^{\phi} = 1 \quad \forall i \in P \quad (\text{eq 5.10})$$

As duas restrições abaixo garantem que os enlaces de fibras são anéis, disjuntos e passam exatamente por um *PoP*, assim a qualidade dos serviços, disponibilidade da rede e nível de serviço é garantido nos projetos.

$$\sum_{j \in \delta^-(i)} x_{ji}^{\phi} - \sum_{j \in \delta^+(i)} x_{ij}^{\phi} = 0 \quad \forall i \in P \quad (\text{eq 5.11})$$

$$\sum_{j \in \delta^-(i)} x_{ji}^{\phi} - \sum_{j \in \delta^+(i)} x_{ij}^{\phi} = 0 \quad \forall i \in \Gamma \quad (\text{eq 5.12})$$

As quatro próximas restrições fazem com que toda vez que o projeto exigir algum tipo de interface entre as tecnologias, seja apresentado no custo final do projeto.

O enlace de fibra que inicia em um *PoP*, deve pagar o custo para uma interface com um anel de fibra

$$q_i^\phi \geq x_{ij}^\phi \quad \forall i \in P; \quad \forall j \in \delta^+(i) \quad (\text{eq 5.13})$$

O enlace de rádio só pode sair de um *PoP* ou *PPC*, e nesse caso deve ser pago o custo da interface com uma estrela de rádio.

$$q_i^\rho \geq x_{ij}^\rho \quad \forall i \in P \cup PPC; \quad \forall j \in \delta^+(i) \quad (\text{eq 5.14})$$

Se um enlace de par metálico sair de um *PoP* ou de um *PPC* que não é atendido por metal, deve ser pago o custo para uma interface com uma árvore de metal.

$$q_i^\mu \geq x_{ij}^\mu \quad \forall i \in P; \quad \forall j \in \delta^+(i) \quad (\text{eq 5.15})$$

$$q_i^\mu \geq x_{ik}^\mu - \sum_{j \in \delta^-(i)} x_{ji}^\mu \quad \forall i \in PPC; \quad \forall k \in \delta^+(i) \quad (\text{eq 5.16})$$

Restrição de altura de uma árvore de metal, ou seja, a distância entre as extremidades da topologia para tecnologia de metal.

$$\sum_{(i,j) \in A} \text{comp}(i, j, \mu) f_{ij}^{\mu\gamma} \leq ALT_MAX \quad \forall \gamma \in \Gamma \quad (\text{eq 5.17})$$

Para respeitar as limitações técnicas da tecnologia de fibra, a restrição abaixo, não permite enlaces de fibra que atendem os clientes sejam maiores do que o comprimento pré-estabelecido. .

$$\sum_{(i,j) \in A} \text{comp}(i, j, \phi) f_{ij}^{\phi\gamma} + \sum_{j \in \delta^+(\gamma)} \text{comp}(\gamma, j, \phi) x_{ij}^\phi \leq COMP_MAX_FIBRA \quad \forall \gamma \in \Gamma \quad (\text{eq 5.18})$$

Todo enlace de rádio possui uma limitação de alcance, por causa das restrições da tecnologia, em função disso, todo enlace de rádio ativo devem ser menores do que o comprimento máximo, nessa dissertação o limite é de 80 km.

$$\text{comp}(i, j, \rho)x_{ij}^{\rho} \leq \text{COMP_MAX_RADIO} \quad \forall (i, j) \in A \quad (\text{eq 5.19})$$

Em função da premissa de não existir enlace de rádio a partir de um cliente i que não seja um PPC , a restrição abaixo anula os enlaces com essas características.

$$x_{ij}^{\rho} = 0 \quad \forall i \in \Gamma \setminus PPC; \quad \forall j \in \delta^+(i) \quad (\text{eq 5.20})$$

Caso i seja um cliente que não é PPC , só poderá sair desse nó um enlace de metal se esse cliente i for atendido por um enlace de metal. Ou seja, não pode haver troca de tecnologias em clientes que não sejam PPC .

$$x_{ik}^{\mu} \leq \sum_{j \in \delta^-(i)} x_{ji}^{\mu} \quad \forall i \in \Gamma \setminus PPC; \quad \forall k \in \delta^+(i) \quad (\text{eq 5.21})$$

Caso i seja um cliente que não é PPC , só poderá sair desse nó um enlace de metal se esse cliente i for atendido por um enlace de metal. Ou seja, não pode haver troca de tecnologias em clientes que não sejam PPC .

$$x_{ik}^{\rho} \leq 1 - \sum_{j \in \delta^-(i)} x_{ji}^{\mu} \quad \forall i \in PPC; \quad \forall k \in \delta^+(i) \quad (\text{eq 5.22})$$

Caso i seja qualquer ponto, exceto $PoPs$, atendido por um enlace de metal ou por um enlace de rádio, não pode sair de i um enlace de fibra óptica. Ou seja, não pode haver troca de tecnologias de metal para fibra óptica ou de rádio para fibra óptica.

$$x_{ik}^{\phi} \leq 1 - \sum_{j \in \delta^-(i)} x_{ji}^{\mu} - \sum_{j \in \delta^-(i)} x_{ji}^{\rho} \quad \forall i \in N \setminus P; \quad \forall k \in \delta^+(i) \quad (\text{eq 5.23})$$

Se i for um PPC , só poderá ser instalado uma interface para tecnologia τ entre nós origem e destino do nó. Não será permitido mudança de tecnologia em i que seja PPC .

$$q_i^\tau \geq \sum_{j \in \delta^+(i)} f_{ij}^{\tau\gamma} - \sum_{j \in \delta^-(i)} f_{ij}^{\tau\gamma} \quad \forall i \in PPC; \quad \forall \gamma \in \Gamma - \{i\}; \quad \forall \tau \in T$$

(eq 5.24)

Deve-se anular as variáveis de interface para fibra óptica em todos os *PPCs*.

$$q_i^\phi = 0 \quad \forall i \in PPC; \quad (eq 5.25)$$

Garantir a existência do arco de fibra óptica ϕ entre os pontos de presença e os clientes, para os clientes que contratam dupla abordagem. Assim, seria garantido que entre dois nós não haja mudança de tecnologia.

$$\sum_{p \in P} \sum_{k \in \delta^+(p)} x_{pk}^\phi \geq x_{ij}^\phi \quad \forall i \in \Gamma; \quad \forall j \in \delta^+(i) \quad (eq 5.26)$$

Garantir a existência do arco de fibra óptica ϕ antes dos pontos de presença. Assim, seria garantida a chegada de fibra óptica no ponto de presença, para que em seguida possa ser encaminhada para o cliente.

$$\sum_{p \in P} \sum_{k \in \delta^-(p) - \{0\}} x_{kp}^\phi \geq x_{ji}^\phi \quad \forall i \in \Gamma; \quad \forall j \in \delta^-(i) \quad (eq 5.27)$$

5.2. Instâncias resolvidas

Buscando uma comparação com resultados do dia a dia, todas as instâncias utilizadas nessa dissertação foram retiradas de problemas práticos de uma operadora. Em conjunto com a empresa Tele Norte Leste S.A. (TELEMAR), grandes projetos serão simulados utilizando o modelo proposto.

Por motivo de confiabilidade, não citaremos os nomes dos clientes envolvidos nos projetos. Além disso, não estaremos avaliando a melhor opção em relação à rede de serviço ou produto oferecido ao cliente.

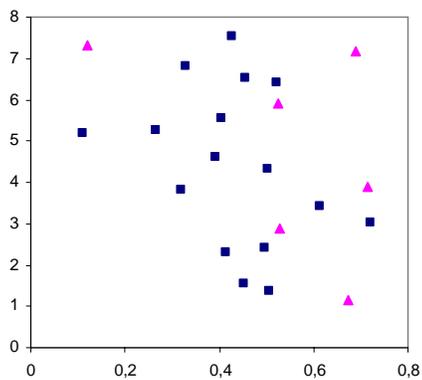
Segue tabela em relação aos custos (de enlace e na estação), capacidade, comprimento máxima, por tecnologia, envolvidos nos projetos.

Tecnologia	Capacidade de Banda (Mbps)	Comprimento Máximo (Km)	Custo do Enlace (R\$/Km)	Custo da estação (R\$)
Fibra Óptica	155	80	7.000	35.000
Rádio Digital de 34M	34	30	0	60.000
Par Metálico	2	1	800	1.500

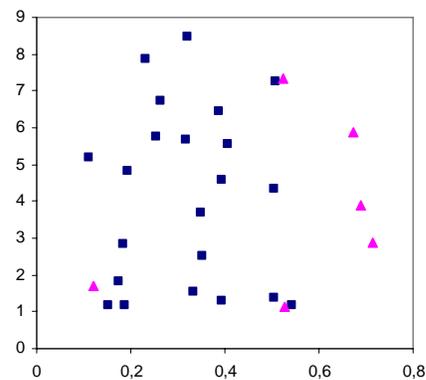
Tabela 10 – Tabela das características técnicas e econômicas por tecnologia

Nos mapas abaixo, encontram-se todos os pontos envolvidos nos dez problemas que serão estudados. Os pontos com formato de quadrado são os clientes e os pontos com o formato de triângulo são os *PoPs*. A escala utilizada nas topologias é a de 1:1000.

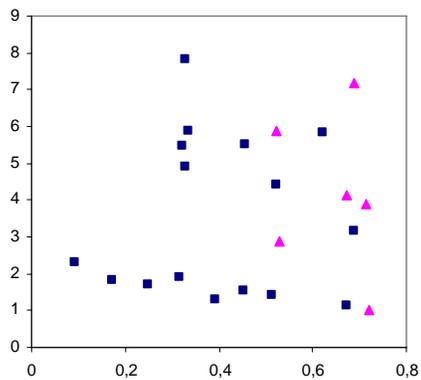
Topologia Problema 1



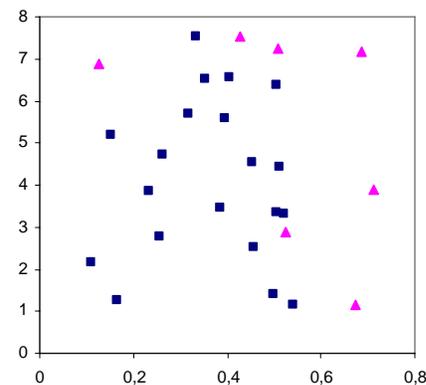
Topologia Problema 2



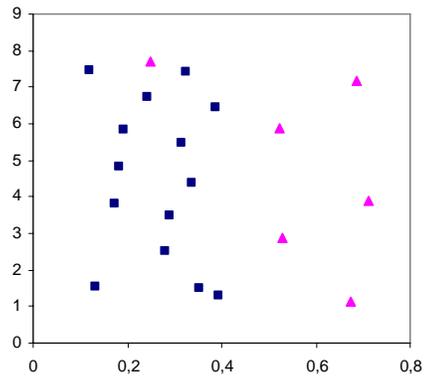
Topologia Problema 3



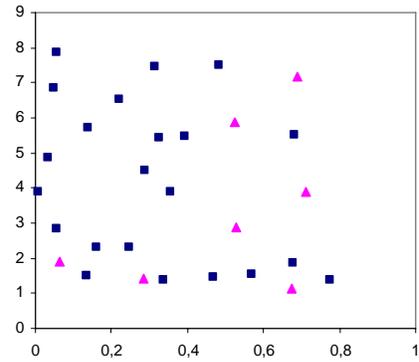
Topologia Problema 4



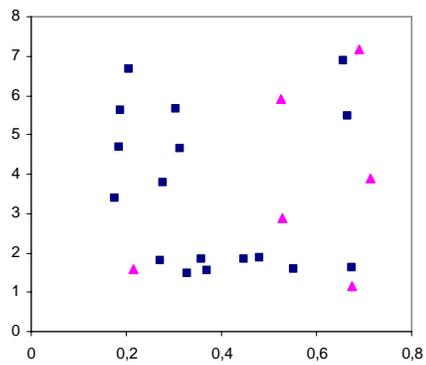
Topologia Problema 5



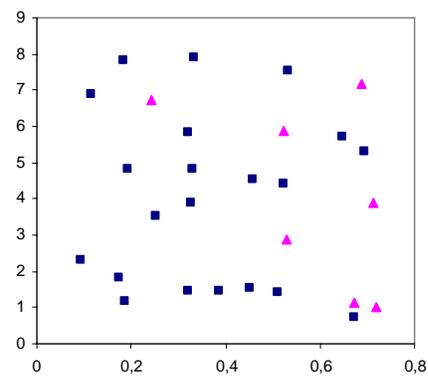
Topologia Problema 6



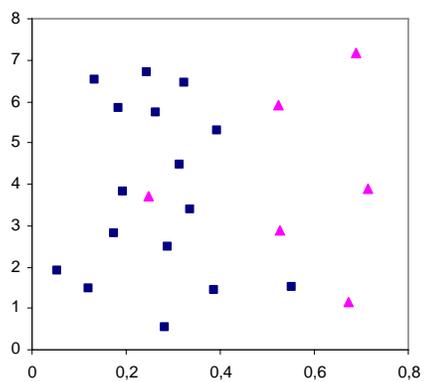
Topologia Problema 7



Topologia Problema 8



Topologia Problema 9



Topologia Problema 10

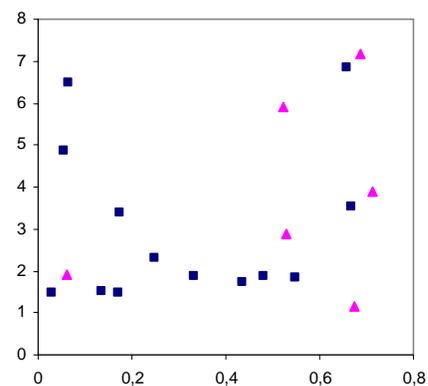


Figura 10 – Topologias dos dez problemas tratados

A seguir, a tabela com as demandas utilizadas dos clientes na resolução dos dez problemas. Vale lembrar que o número de clientes varia entre os

problemas e, conseqüentemente, o número de demandas também. Além disso, cada demanda será apresentada em Mbits/s.

D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
1	1	34	2	1	2	155	34	155	2
2	34	4	8	2	1	155	155	1	1
1	155	8	1	34	34	2	2	2	34
34	155	8	1	34	155	2	1	34	34
155	34	1	1	34	155	2	155	34	155
2	4	2	1	1	155	34	34	34	155
34	2	1	1	2	1	1	4	1	155
1	34	155	34	2	1	2	8	2	2
155	155	1	34	1	2	34	8	2	2
1	2	1	34	2	2	2	1	1	2
2	4	1	155	1	1	2	2	2	34
1	1	1	155	34	2	34	1	1	1
34	34	1	1	155	1	34	155	34	2
155	155	2	2	155	34	2	1	155	2
155	2	8	2		34	1	1	155	1
34	1	1	155		155	1	1	155	
	155		155		155	1	1		
	34		1		155		1		
	4		2		2		2		
	8		34		2		8		
	8				2		1		
	1				34				

Tabela 11 – Tabela com as demandas dos clientes dos dez problemas

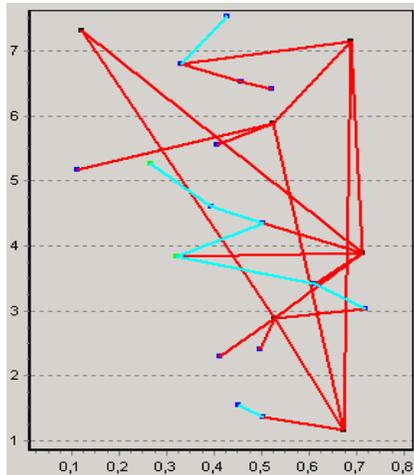
O computador utilizado ao longo de todo o processamento aqui descrito foi um Pentium IV 2.5 GHz com 1 Gmb de memória de RAM. O modelo foi implementado no software Xpress-IVE, versão 1.14.10.

5.3. Resultados computacionais

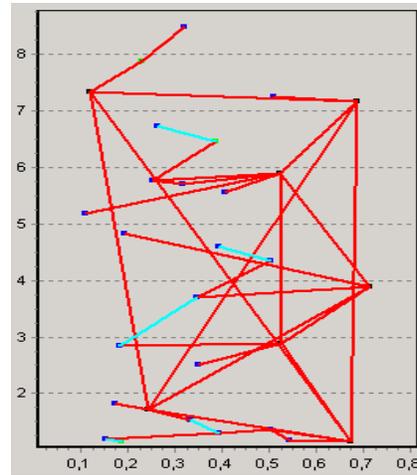
A seguir, as topologias finais dos problemas. A escala utilizada nas topologias é a de 1:1000. Nas topologias abaixo, os enlaces de cor vermelha, amarelo e azul representam fibra óptica, rádio e par metálico, respectivamente.

Em relação aos nós a cor azul, verde e preta representam clientes, *PoPs* e *PPCs*, respectivamente.

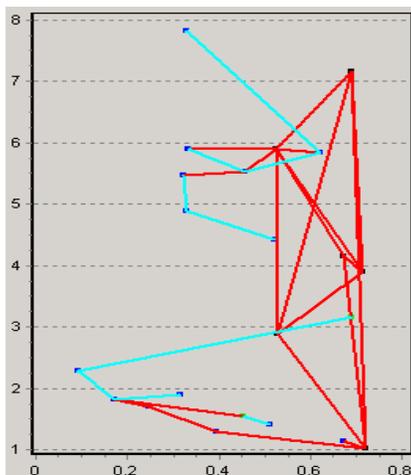
Topologia Final – Problema 1



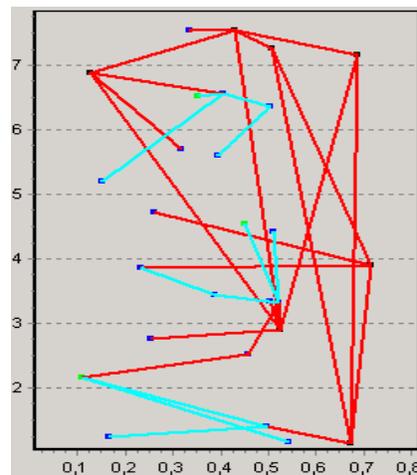
Topologia Final – Problema 2



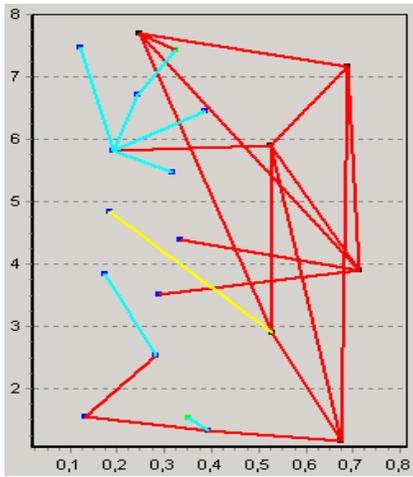
Topologia Final – Problema 3



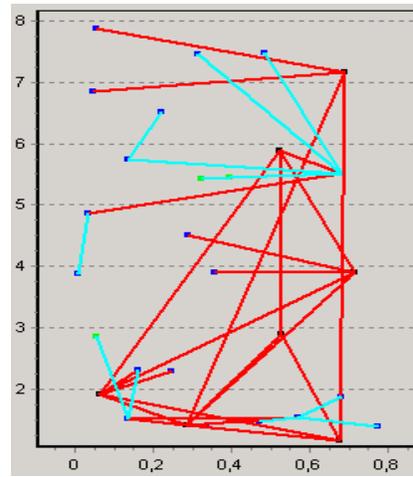
Topologia Final – Problema 4



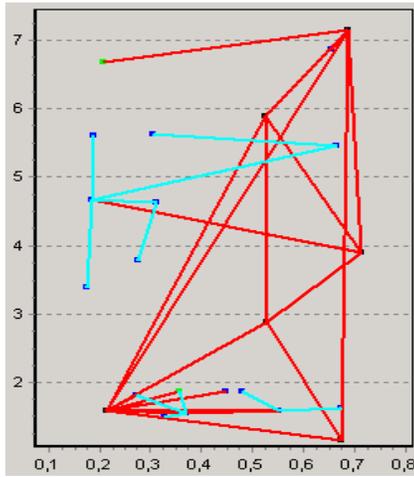
Topologia Final – Problema 5



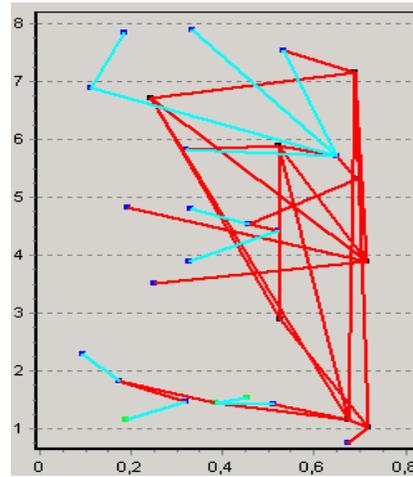
Topologia Final – Problema 6



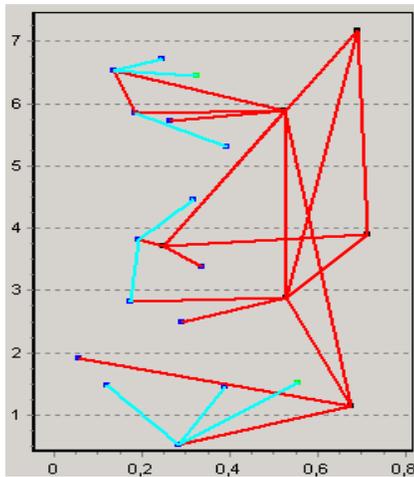
Topologia Final – Problema 7



Topologia Final – Problema 8



Topologia Final – Problema 9



Topologia Final – Problema 10

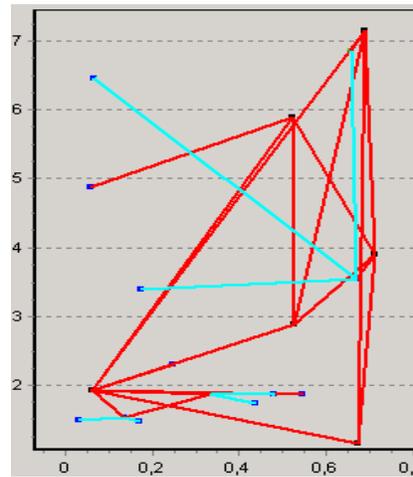


Figura 11 – Topologias finais dos problemas

A tabela abaixo resume os resultados numéricos, de todos os problemas, sendo que a segunda e terceira coluna informam o número de *PoPs* e clientes para cada problema, respectivamente. Na quarta coluna encontra-se o tempo de resolução. Na quinta coluna são apresentados os custos reais atuais (sem otimização) de cada uma das redes, enquanto que na sexta coluna aparecem os custos respectivos resultantes do processo de otimização. Na sétima coluna, encontra-se a variação do custo final de cada projeto, sendo que em média, o ganho para os problemas tratados é de 15%.

Problemas	Nº POP	Nº Cliente	Tempo (segs)	Custo do Projeto sem modelo (R\$)	Custo do Projeto com modelo (R\$)	Δ %
P1	6	16	38,2	630.500,00	547.389,00	13%
P2	7	22	1.524,9	980.000,00	814.790,00	17%
P3	6	16	10,9	320.050,00	257.068,00	20%
P4	7	20	1.640,0	790.000,00	639.722,00	19%
P5	6	14	63,0	640.000,00	551.098,00	14%
P6	7	22	807,5	750.200,00	694.983,00	7%
P7	6	17	40,7	480.000,00	396.746,00	17%
P8	7	21	566,6	790.000,00	613.906,00	22%
P9	6	16	28,7	650.000,00	597.621,00	8%
P10	6	13	135,8	500.000,00	431.205,00	14%

Tabela 12 - Tabela com os resultados dos problemas

6

Problema de Configuração de Trails nas Redes SDH

O Problema de Configuração de *Trails* nas Redes SDH (PCTRS) consiste em determinar a melhor configuração lógica da rede SDH em função da demanda de *trails* e da rede física.

O *trail* é um circuito virtual com uma banda de 155 MB que é utilizado para transportar circuitos de baixa hierarquia entre dois elementos ou dois pontos da rede. Um circuito de baixa hierarquia seria, por exemplo, um circuito de 34 MB ou 2 MB.

Na rede SDH, com equipamento ADM-16, cada elemento suporta oito ou dezesseis *trails* quando a rede está configurada em sistema de proteção chamado *Mspring*. O valor limite de *trails* fica em função da quantidade de fibras utilizadas entre os elementos, podendo ser de duas ou quatro fibras, respectivamente. Mais detalhes sobre formas de proteção em anéis SDH no capítulo 3.

Nessa dissertação, será utilizado anel SDH com duas fibras com sistema de proteção *Mspring* e equipamentos ADM-16. Uma característica marcante nos *backbones* nacionais é de possuírem anéis conectados por até dois pontos com outros anéis. A figura abaixo representa uma topologia típica das redes nacionais.

Essa característica é utilizada por causa da grande extensão territorial do Brasil. Além disso, a concentração de riquezas no litoral fortalece ainda mais esse perfil dos *backbones* nacionais.

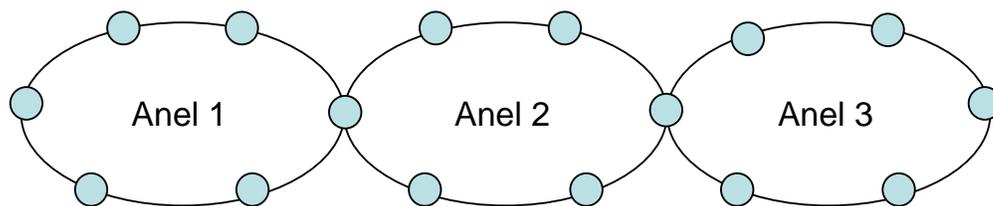


Figura 12 – Tipo de topologia de malha

Para modelagem matemática, foram criados “nós virtuais” a partir dos “nós reais” das redes. Da seguinte forma:

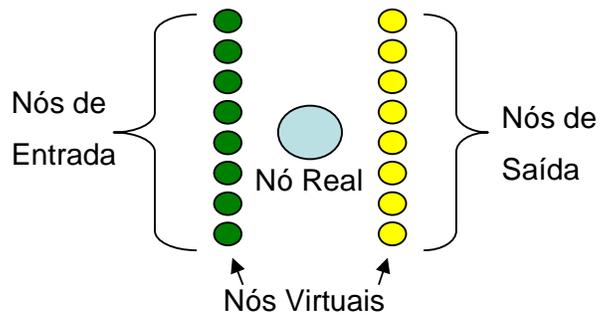


Figura 13 – Representação de cada nó real no modelo proposto

A representação acima é utilizada para os anéis SDH configurados com ADM-16, sistema de proteção *Mspring* e com duas fibras. Para os anéis com quatro fibras o número de nós virtuais criados na entrada e saída passa para dezesseis.

Nesta dissertação, foram utilizados instâncias com anéis de duas e quatro fibras. Abaixo, representamos como são as conexões entre os nós. Para facilitar o entendimento do leitor utilizaremos apenas dois anéis virtuais na entrada e na saída. As conexões diretas entre os nós virtuais do mesmo nó real, têm um custo parametrizado pelas conexões indiretas. Para garantir a melhor topologia virtual, ou seja, o melhor caminho para os *trails*, a função objetivo do modelo minimiza os custos dos enlaces, garantindo um maior número de conexões diretas.

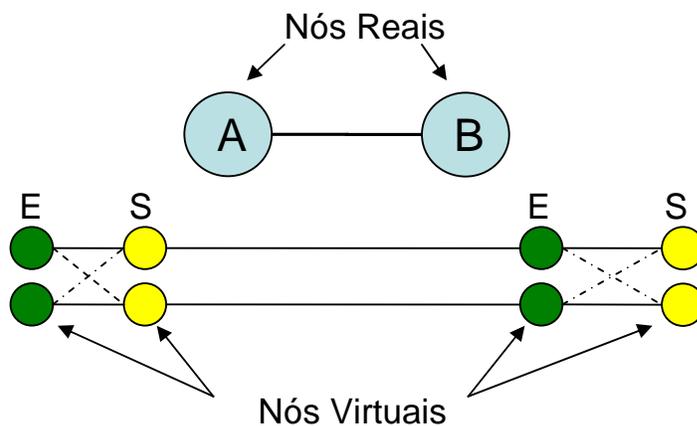


Figura 14 – Expansão dos nós virtuais em função dos nós reais.

O modelo poderá ser usado de duas formas. Na primeira, o usuário pode propor uma nova configuração, e por conseqüência, uma nova ocupação da rede

SDH, com o objetivo de liberar facilidades que permitam a configuração de novos *trails*. A outra forma, seria no planejamento da topologia virtual dos anéis da rede SDH.

Como no PPNRT, a formulação adotada para PCTRS será *Shortest Path Problem* baseada em *Minimum Cost Flow* para programação linear e inteira. Restrições garantindo o caminho de atendimento, a utilização dos nós virtuais e a correta ocupação dos canais foram desenvolvidas melhorando a performance e os resultados do modelo. Como foi dito no capítulo anterior, diferentes métodos já foram propostos para solucionar esse problema.

A seguir detalhamos os índices, conjuntos, dados, variáveis e formulação utilizada.

6.1. Modelo

6.1.1. Índices

Seguem os índices do modelo:

- i : vértice de origem do arco;
- j : vértice de destino do arco;
- τ : *trail* a ser configurado

6.1.2. Conjuntos

Seguem os conjuntos do modelo:

- ε : conjunto de nós de entrada;
- ω : conjunto de nós de saída;
- N : conjunto de todos os nós, $N = \varepsilon \cup \omega$
- T : conjunto de *trails*;
- $\delta^+(i)$: conjunto de todos os nós que possuem um arco cuja extremidade de origem esteja no nó i ;
- $\delta^-(i)$: conjunto de todos os nós que possuem um arco cuja extremidade de destino esteja no nó i ;

- $\Theta(i)$: conjunto de nós de saída conectados a i , sendo i um nó de entrada, do mesmo nó real;
- Φ : conjunto de todos nós de entrada e todos nós de saída do *trail*.

6.1.3. Dados

Seguem os dados do modelo:

- $custo(i, j)$: custo de um enlace do nó i ao nó j ;
- $\alpha(i, \tau)$: nó de origem do *trail* τ ;
- $\beta(i, \tau)$: nó de destino do *trail* τ ;
- $x(i, j)$: enlace ativo entre o nó i e nó j .

6.1.4. Variáveis

As seguintes variáveis do problema são binárias:

- f_{ij}^{τ} : variáveis binárias que indicam se existe fluxo do *trail* τ passando pelo arco $\left(\overset{\rightarrow}{i, j}\right)$, ou seja $(f_{ij}^{\tau} = 1)$ existe o fluxo ou $(f_{ij}^{\tau} = 0)$ não existe;

6.1.5. Modelo

Função objetivo:

O modelo busca reduzir o custo dos arcos ativos. Como já foi explicado a modelagem matemática desse modelo cria nós virtuais e, conseqüentemente, as interligações ou arcos entre esses nós. Com isso, a função objetivo busca a minimização desses enlaces, garantindo a melhor solução do problema.

$$MIN \left\{ \sum_{\tau \in \Gamma} \sum_{(i,j) \in N} f_{ij}^{\tau} \times custo(i, j) \right\} \quad (\text{eq 6.1})$$

Restrições

As três restrições que se seguem garantem a fluidez ou interconexão dos nós, para todos os *trails* do problema. Dessa forma, toda ponta A e B dos *trails* estarão conectadas garantido a comunicação.

$$\sum_{i \in \alpha(i, \tau)} \sum_{j \in \delta^+(i)} f_{ij}^\tau - \sum_{i \in \alpha(i, \tau)} \sum_{j \in \delta^-(i)} f_{ji}^\tau = -1 \quad \forall \tau \in \mathbf{T} \quad (\text{eq 6.2})$$

$$\sum_{i \in \beta(i, \tau)} \sum_{j \in \delta^+(i)} f_{ij}^\tau - \sum_{i \in \beta(i, \tau)} \sum_{j \in \delta^-(i)} f_{ji}^\tau = 1 \quad \forall \tau \in \mathbf{T} \quad (\text{eq 6.3})$$

$$\sum_{j \in \delta^+(i)} f_{ij}^\tau - \sum_{j \in \delta^-(i)} f_{ji}^\tau = 1 \quad \forall \tau \in \mathbf{T}; \forall i \in N - \{\Phi\} \quad (\text{eq 6.4})$$

Como existem inúmeros meios de interconectar dois pontos numa instância, a restrição abaixo, garante que todo caminho de atendimento de cada *trail* só vai passar nos enlaces ativados:

$$f_{ij}^\tau \leq x(i, j) \quad \forall (i, j) \in N; \forall \tau \in \mathbf{T} \quad (\text{eq 6.5})$$

Para garantir que não existam conexões indevidas entre nós virtuais, a restrição abaixo é apresentada por essa dissertação, com o objetivo de zerar todos os enlaces onde a ponta A e ponta B façam parte dos conjuntos de entrada ou saída de cada *trail*. Sendo assim, o caminho de atendimento de cada *trail* não pode passar por dois nós de entrada seguidos ou dois nós de saída seguidos.

$$f_{ij}^\tau = 0 \quad \forall \tau \in \mathbf{T}; \quad i \in \mathcal{E}; \quad j \in \mathcal{E} \quad (\text{eq 6.6})$$

$$f_{ij}^\tau = 0 \quad \forall \tau \in \mathbf{T}; \quad i \in \omega; \quad j \in \omega \quad (\text{eq 6.7})$$

A restrição abaixo, proposta nessa dissertação, garante que não existe fluxo entre o nó i para o nó j ou vice-versa de qualquer *trail*. Sendo assim, evitamos que no mesmo caminho haja tráfego ao mesmo tempo de A para B e B para A.

$$f_{ij}^{\tau} + f_{ji}^{\tau} \leq 1 \quad \forall \tau \in T; \quad \forall (i, j) \in N \quad (\text{eq 6.8})$$

O modelo propõe a criação de “nós virtuais” a partir de “nós reais”, um *trail* pode ocupar mais de um nó virtual em cada nó real. Como significaria numa má ocupação dos recursos disponíveis, a restrição abaixo proposta nessa dissertação, garante que só um nó virtual será ocupado.

$$\sum_{i \in \alpha(i, \tau)} \sum_{j \in \omega} f_{ji}^{\tau} - \sum_{i \in \alpha(i, \tau)} \sum_{j \in \omega} f_{ij}^{\tau} \leq 1 \quad \forall \tau \in T \quad (\text{eq 6.9})$$

Os equipamentos atuais só permitem que cada enlace seja ocupado por um *trail*, sendo a restrição abaixo garante que independente do sentido, de todos os *trails* do problema, apenas um ocupará o enlace entre A e B, por exemplo. Conseqüentemente, essa restrição, também, garante que não haja uma má ocupação de recursos disponíveis na rede.

$$\sum_{\tau \in T} f_{ij}^{\tau} + \sum_{\tau \in T} f_{ji}^{\tau} \leq 1 \quad \forall (i, j) \in N \quad (\text{eq 6.10})$$

Cada nó real gera um número específico de nós virtuais, em função da instância. Sendo assim, essa dissertação propõe a criação de uma restrição que não permita que nós virtuais de saída e nós virtuais de entrada se ativem indevidamente, ou seja, em um nó real deve existir uma interconexão entre um nó virtual de entrada e saída ou vice-versa.

$$\sum_{\tau \in T} \sum_{j \in x(i, j)} f_{ij}^{\tau} - \sum_{\tau \in T} \sum_{j \in \Theta(i)} f_{ij}^{\tau} = 0 \quad \forall i \in \mathcal{E} \quad (\text{eq 6.11})$$

6.2. Instâncias resolvidas

Como na resolução do problema do capítulo cinco, as instâncias utilizadas foram fornecidas pela empresa Tele Norte Leste S.A. (Telemar). Com isso, podemos analisar o desempenho do modelo, em situações e topologias que encontramos nas empresas.

Por se tratar de um assunto confidencial não citaremos a localidade e as estações da rede utilizada.

Podem ser utilizados inúmeros critérios para avaliar a eficiência do modelo, porém concentraremos no aspecto visual da tabela a seguir, no número de nós pelos quais os *trails* passam e o aumento de disponibilidade dos maiores trechos.

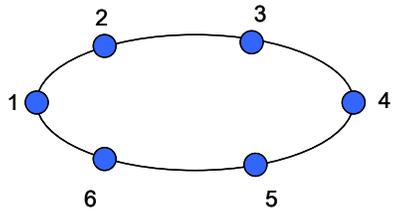
Estaremos utilizando instâncias (redes) formadas por anéis compostos por um único anel, ou seja, cada nó real possui apenas dois enlaces de interconexões. As cinco primeiras instâncias representam redes com proteção de duas fibras e a restante com proteção de quatro fibras. Todas redes são compostas por elementos AMD-16. A tabela, abaixo, representa uma instância, onde nas colunas temos as configurações dos *trails*, ou seja, como é a configuração na rede. Cada linha representa a entrada ou saída de uma estação, sendo que a primeira entrada está interconectada com a última saída. No próximo sub-capítulo, todas as instâncias serão apresentadas com os resultados ao lado, facilitando a comparação final.

ESTAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8
EST 1	E			T1	T7		T10	
	S		T2					
EST 2	E			T3	T9			T4
	S	T11				T6		
EST 3	E			T12				
	S		T8				T5	
EST 4	E							
	S							
EST 5	E							
	S							
EST 6	E		T7					
	S	T1			T2			T10

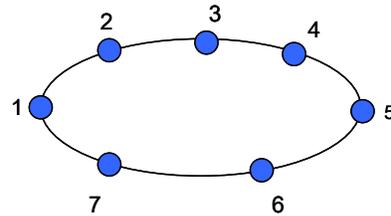
Figura 15 – Ocupação das redes antes do modelo

A seguir, todas as topologias dos anéis utilizados nas instâncias. Os nós apresentados nas topologias são os nós reais.

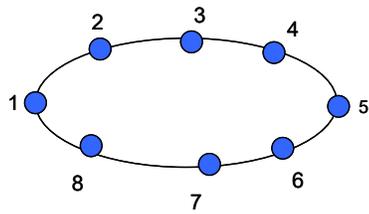
Topologia do Problema 1



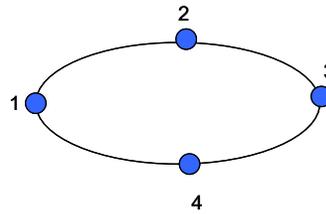
Topologia do Problema 2



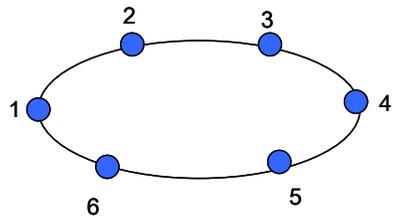
Topologia do Problema 3



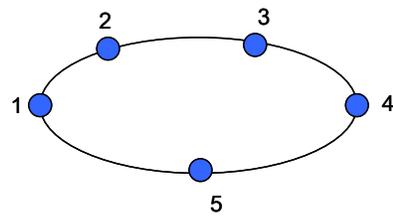
Topologia do Problema 4



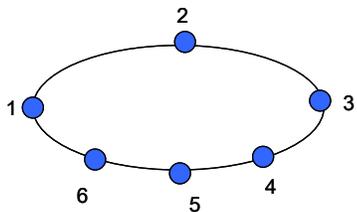
Topologia do Problema 5



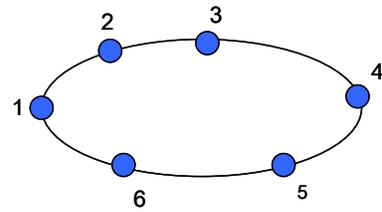
Topologia do Problema 6



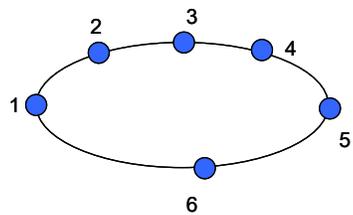
Topologia do Problema 7



Topologia do Problema 8



Topologia do Problema 9



Topologia do Problema 10

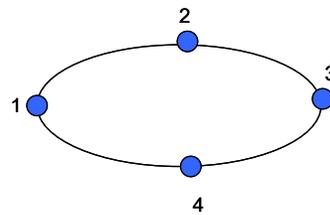


Figura 16 – Topologias adotadas nos problemas

6.3. Resultados computacionais

A seguir seguem as tabelas com todas as instâncias e resultados após utilização do modelo. Na coluna da esquerda pode ser visto como cadaanel está ocupado e na coluna da direita a ocupação depois do modelo. A partir do problema 6, primeiro é apresentado a ocupação antes e abaixo, a situação após o modelo.

ESTAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8
EST 1	E	T11		T2	T1	T7		
EST 2	S							
EST 3	E							
EST 4	S			T8	T12			T5
EST 5	E							
EST 6	S		T1	T7			T2	

Ocupação do Problema 1 – Antes

ESTAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8
EST 1	E	T11	T2	T3	T1	T7	T9	T10
EST 2	S							
EST 3	E			T6				
EST 4	S			T5				
EST 5	E				T8	T12		
EST 6	S		T2	T1		T7		T10

Ocupação do Problema 1 - Depois

ESTAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8
EST 1	E	T14	T1				T17	T7
EST 2	S	T2	T16	T9	T18	T11	T3	
EST 3	E			T15	T18			T6
EST 4	S		T8	T15	T4	T13	T8	T5
EST 5	E	T10						
EST 6	S		T1	T7				T14
EST 7	E	T3		T9		T17		

Ocupação do Problema 2 - Antes

ESTAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8
EST 1	E	T1	T14	T7				
EST 2	S				T9	T11	T17	
EST 3	E	T16	T2	T6		T18	T12	T18
EST 4	S	T8	T13					T15
EST 5	E			T5	T4	T8		
EST 6	S		T10					
EST 7	E	T1	T14	T7		T17		

Ocupação do Problema 2 - Depois

ESTAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8
EST 1	E S	T3 T4		T9				T14
EST 2	E S		T13	T1			T12	T6
EST 3	E S		T13		T2			T7
EST 4	E S	T8						
EST 5	E S			T11				
EST 6	E S							
EST 7	E S		T4	T5				
EST 8	E S	T3						T14

Ocupação do Problema 3 – Antes

ESTAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8
EST 1	E S	T3 T4		T9				
EST 2	E S	T6	T1				T12	
EST 3	E S	T13			T2			
EST 4	E S	T8						
EST 5	E S			T11				
EST 6	E S							
EST 7	E S							
EST 8	E S	T3						

Ocupação do Problema 3 - Depois

ESTAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8
EST 1	E S	T6 T13		T9				T5
EST 2	E S	T4	T8	T7	T10			
EST 3	E S		T8	T12		T11	T1	
EST 4	E S	T3 T6		T9				T2

Ocupação do Problema 4 – Antes

ESTAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8
EST 1	E S	T5 T6		T9				
EST 2	E S	T4	T7		T10			
EST 3	E S	T1	T8	T12		T11		
EST 4	E S	T2 T5	T3		T9			

Ocupação do Problema 4 - Depois

ESTAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8
EST 1	E S			T5	T2			
EST 2	E S	T15	T1	T6	T5	T10	T8	T9
EST 3	E S	T15		T4	T7	T13	T16	T14
EST 4	E S		T12	T3	T11	T4		
EST 5	E S							
EST 6	E S		T2		T5			

Ocupação do Problema 5 - Antes

ESTAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8
EST 1	E S	T2						
EST 2	E S	T1	T6	T5	T10	T8	T9	T14
EST 3	E S	T12	T3	T4	T7	T13	T16	T14
EST 4	E S							
EST 5	E S							
EST 6	E S	T2		T5				

Ocupação do Problema 5 - Depois

ESTAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
EST 1	E S	T5														
EST 2	E S				T8	T14	T6		T7			T1				
EST 3	E S				T12	T11		T10		T3				T4		
EST 4	E S				T13											
EST 5	E S	T5														

Ocupação do Problema 6 – Antes

ESTAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
EST 1	E S	T5														
EST 2	E S	T1	T2	T4	T3	T6	T7	T8								
EST 3	E S	T9				T10	T11	T12	T14							
EST 4	E S						T13									
EST 5	E S	T5														

Ocupação do Problema 6 – Depois

ESTAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
EST 1	E S	T14								T13						
EST 2	E S		T7								T2			T1		
EST 3	E S	T8			T9	T12				T5			T4			
EST 4	E S			T16		T15		T17								
EST 5	E S										T18					
EST 6	E S	T14	T20								T13	T11				T10

Ocupação do Problema 7 - Antes

ESTAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
EST 1	E S	T3	T19	T13	T14											
EST 2	E S	T1	T2				T7									
EST 3	E S	T4			T5	T6	T8									
EST 4	E S							T9		T12						
EST 5	E S	T10	T11	T18		T16										
EST 6	E S	T3	T19	T13	T14	T20										

Ocupação do Problema 7 – Depois

ESTAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
EST 1	E S	T1 T2														
EST 2	E S		T3 T4													
EST 3	E S	T6														
EST 4	E S		T13													
EST 5	E S			T18												
EST 6	E S	T1 T2				T5										

Ocupação do Problema 8 – Antes

ESTAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
EST 1	E S	T1 T2														
EST 2	E S		T3 T4													
EST 3	E S	T6														
EST 4	E S	T13														
EST 5	E S		T18													
EST 6	E S	T1 T2				T5										

Ocupação do Problema 8 – Depois

ESTAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
EST 1	E S															
EST 2	E S															
EST 3	E S	T2														
EST 4	E S		T6													
EST 5	E S															
EST 6	E S	T3 T4	T15 T16	T7												

Ocupação do Problema 9 – Antes

ESTAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
EST 1	E S	T4														
EST 2	E S		T3													
EST 3	E S	T2														
EST 4	E S		T6													
EST 5	E S															
EST 6	E S	T4	T3 T15	T7												

Ocupação do Problema 9 – Depois

ESTAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
EST 1	E	T1	T7	T2	T22	T8	T11	T12	T13	T16	T19	T20	T21	T24		
	S	T4		T3	T5	T23	T6	T17		T18						
EST 2	E	T10														
	S															
EST 3	E		T14													
	S															
EST 4	E			T2												
	S	T1	T7		T22	T8	T11	T12	T13	T16		T20	T21	T24		

Ocupação do Problema 10 – Antes

ESTAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
EST 1	E	T1	T2	T7	T8	T11	T12	T13	T16	T20	T21	T22	T24			
	S	T3	T4	T5	T6	T17				T23						
EST 2	E															
	S		T10						T19							
EST 3	E															
	S	T14														
EST 4	E	T14	T2	T15						T20						
	S	T1	T7	T8	T11	T12	T13	T16		T21	T22	T24				

Ocupação do Problema 10 - Depois

Figura 17 – Comparação da ocupação antes e depois da modelo

Como pode ser visto na tabela 13, um resumo dos resultados de todos os problemas tratados segundo esse modelo, com a comparação da quantidade de trechos disponíveis que cobre o anel inteiro e tempo gasto em cada simulação. Mas vale lembrar que a crítica visual, ou seja, comparando a situação antes e depois do modelo poderá facilitar maiores comentários.

	Nº de nós	Nº de trails	Nº trechos disponíveis em todo anel antes do modelo	Nº trechos disponíveis em todo anel depois do modelo	Tempo (segs)
P1	6	12	0	3	52,1
P2	7	20	0	0	294,2
P3	8	14	0	1	275,1
P4	4	14	0	1	5,8
P5	6	6	0	0	45
P6	5	14	5	8	704,7
P7	6	20	3	6	25,8
P8	6	20	3	6	47,9
P9	6	20	5	7	39,3
P10	4	24	2	3	12,5

Tabela 13 – Consolidação dos resultados

7

Conclusão e Trabalhos Futuros

Nesta dissertação foram apresentados dois problemas críticos do cenário atual do mercado de telecomunicações brasileiro. Primeiro foi feita uma introdução técnica sobre os meios de transmissão mais utilizados no Brasil, que foram usados no modelo do PPNRT.

Em seguida, foram introduzidos os conceitos da Rede PDH e SDH, além disso, foram abordados os tipos de proteção utilizados e as topologias mais encontradas no mercado.

Com o objetivo de enriquecer a dissertação, foram apresentados resumos dos estudos com mais destaques. Depois, introduzimos os problemas estudados e os modelos propostos nessa dissertação.

Para o PPNRT observou-se um tempo razoável para resolução dos problemas, considerando-se que uma equipe de projeto chega a gastar mais de uma semana para apresentar uma proposta. Uma instância com vinte e sete pontos resolvidos pelo modelo apresentado nessa dissertação gastou em torno de uma meia hora. Porém, na prática essa mesma instância gastaria mais de 15 dias para se concluir a melhor solução.

Outra característica, extremamente, marcante é a redução de custo que o modelo conseguiu, em média, 15% do valor real.

Não podemos esquecer que o modelo possui limitações. A seguir, itens que poderão incrementar e dificultar o problema, ficando assim, sugeridos como parte de trabalhos futuros:

- Restrições de relevo, ou seja, trechos que não podem ser utilizados;
- Aspectos urbanos, por exemplo, em muitas cidades, qualquer cabeamento não pode cruzar qualquer tipo de rua;
- As redes de serviço e as suas interfaces de conexão com as redes de transporte;
- Aumento de tecnologias disponíveis, por exemplo, satélite, outros modelos de rádio e até WiMax;

- Capacidade de sugerir expansões nos *PoPs* ;
- Adequação da demanda do cliente em função de um portfólio da empresa;
- Adotar diferentes modelos de SDH;
- E, por último, que na verdade seria uma variação do problema, é definir qual o melhor produto para atender uma demanda específica do cliente.

Para o PCTRS foi apresentado uma representação matemática para a topologia real, em que nós virtuais eram criados para representar as entradas e saídas do nó real. Vale lembrar, que nos anéis de quatro fibras o número de canais de entrada e saída é de 16 para cada um, enquanto que, para os anéis de duas fibras só pode existir 8 para entrada e saída.

Podemos ver que após a aplicação do modelo, a disponibilidade de canais que cobriam os anéis aumentou. Além disso, pode-se perceber que os espaços na tabela de ocupação se reduziram.

Podemos afirmar a eficiência do modelo, considerando que o objetivo é reduzir os espaços e aumentar a disponibilidade de canais.

Porém, como no modelo anterior, existem limitações que podem ser revertidas em trabalhos futuros. Seguem algumas sugestões de trabalhos nessa direção.

- Considerar uma topologia em malha;
- Aperfeiçoar os métodos de aproximação da solução;
- Preparar o modelo para uma rede com muitos anéis e estações, por exemplo, 8 anéis e 100 estações;
- Permitir diferentes tipos de proteção no mesmo problema.

Trazendo dois problemas que as empresas enfrentam no dia-a-dia e geram desperdício de recursos, vemos que a aplicação de Programação Matemática pode gerar resultados positivos em função dos excelentes resultados encontrados. Além disso, com o dinamismo que o mercado exige das operadoras, soluções rápidas e econômicas valorizam os produtos oferecidos aos clientes.

8

Referências

- [1] A. S. Tanenbaum, Computer Network, EUA: Prentice Hall, 1996
- [2] Mukherjee, B. Optical Communication Networks, McGraw-Hill, New York, 1997.
- [3] Ramaswami, R. e Sivarajan, K. N., Optical Networks A Practical Perspective, Morgan Kaufmann, San Francisco, 2003.
- [4] Kramer, G. e Pesavento, G. Ethernet passive optical networks (EPON): Building a next-generation optical access network. IEEE Communications Magazine, 40, 66-73, 2002.
- [5] Stern, T. E. e Bala, K., Multiwavelength Optical Networks: A Layered Approach, Addison Wesley, 1999
- [6] Gencata, A., Singhal, N. e Mukherjee, B., Overview of Optical Communication Networks: Current and Future Trends, em Handbook of Optical Communication Networks, pp 2-21, Eds. Ilyas, M. e Mouftah, H. T., CRC Press, Boca Raton, 2003
- [7] Lindberg, B. C., Digital Broadband Networks & Services, McGraw Hill, 1997.
- [8] NEC do Brasil, SDH, NEC, 1998
- [9] Di-Lorenzo B., Shultz S., Conforming to Maze of Network Standards, Wandel & Golterman Communications TesT Solutions, Alemanha, 1998
- [10] Habisreiter W., Kaplan F., Ring Testing Enhances Reliability of SDH and SONET Ring Structures, Wandel & Golterman Communications, Alemanha, 1998
- [11] Stern, T. E. and Bala, K., 1999. Multiwavelength Optical Networks: A Layered Approach, Addison Wesley, Boston.
- [12] Green, P., 2001. Progress in optical networking, IEEE Communicaions Magazine, 39, 54-61.
- [13] Mukherjee, B., 1992. WDM-based local lightwave networks–Part I: Single-hop systems, IEEE Network, 6, 12-27.
- [14] Mukherjee, B., 1992. WDM-based local lightwave networks–Part II: Multihop systems, IEEE Network, 6, 20-32.

[15] Kazovsky, L. G. and Poggiolini, P. T., 1993. STARNET: a multi-gigabit-per-second optical LAN utilizing a passive WDM star, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 11, 1009-1027.

[16] Jia, F., Mukherjee, B. and Iness, J., 1995. Scheduling variable-length messages in a single-hop multichannel local lightwave network, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 3, 477-488.

[17] Duanyang, G. and Acampora, A. S., 1996. Scalable multihop wdm passive ring with optimal wavelength assignment and adaptive wavelength routing, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 14, 1264-1277.

[18] Marsan, M. A., Bianco, A., Leonardi, E., Meo, M. and Neri, F., 1996. MAC protocols and fairness control in WDM multirings with tunable transmitters and fixed receivers, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 14, 1230-1244.

[19] Hamad, A. M. and Kamal, A. E., 2002. A survey of multicasting protocols for broadcast-and-select single-hop networks. *IEEE Network*, 16, 36-48.

[20] Tridandapani, S. B., Mukherjee, B. and Hallingstad, G., 1997. Channel sharing in multi-hop WDM lightwave networks: do we need more channels?, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 5, 719-727.

[21] Kramer, G. and Pesavento, G., 2002. Ethernet passive optical networks (EPON): Building a next-generation optical access network. *IEEE Communications Magazine*, 40, 66-73.

[22] Kramer, G., Mukherjee, B. and Pesavento, G., 2002. IPACT: A dynamic protocol for an Ethernet PON (EPON), *IEEE Communications Magazine* 40, 74-80.

[23] Green, P. E., 2002. Paving the last mile with glass, *IEEE Spectrum* 39, 13-14.

[24] Davis, C. C., Smolyaninov, I. I. and Milner, S. D., 2003. Flexible optical wireless links and networks, *IEEE Communications Magazine*, 41, 51-57.

[25] Chiu, A. L. and Modiano, E. H., 2000. Traffic grooming algorithms for reducing electronic multiplexing costs in WDM ring networks, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 18, 2-12.

[26] Gerstel, O., Ramaswami, R. and Sasaki, G. H., 2000. Cost-effective traffic grooming in WDM rings, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 8, 618-630.

[27] Zhang, X. and Qiao, C., 2000. An effective and comprehensive approach for traffic grooming and wavelength assignment in SONET/WDM rings, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 8, 608-617.

[28] Berry, R. and Modiano, E. H., 2000. Reducing electronic multiplexing costs in SONET/WDM rings with dynamically changing traffic, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18, 1961-1971.

[29] Wang, J., Cho, W., Vemuri, V. R. and Mukherjee, B., 2001. Improved approaches for cost-effective traffic grooming in WDM ring networks: ILP formulations and single-hop and multihop connections, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 19, 1645-1653.

[30] Dutta, R. and Rouskas, G. N., 2002. On optimal traffic grooming in WDM rings, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20, 110-121.

[31] Grover, W. D. and Doucette, J., 2001. A novel heuristic for topology planning and evolution of optical mesh networks, *IEEE GLOBECOM*, San Antonio, USA, November 25-29, pp. 2169-2173.

[32] Ali, M., 2002. Optimization of splitting node placement in wavelength-routed optical networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20, 1571-1579.

[33] Ramamurthy, B., Datta, D., Feng, H., Heritage, J. P. and Mukherjee, B., 1999. Impact of transmission impairments on the teletraffic performance of wavelength routed optical networks, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 17, 1713-1723.

[34] Zang, H., Ou, C. and Mukherjee, B., 2003. Path-protection routing and wavelength assignment (RWA) in WDM mesh networks under duct-layer constraints, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 11, 248-258.

[35] Zang, H. and Mukherjee, B., 2001. Connection management for survivable wavelength routed WDM mesh networks, *Optical Networks Magazine*, 2, 17-28.

[36] Ramamurthy, S. and Mukherjee, B., 1999. Survivable WDM mesh networks, Part I—protection, *IEEE INFOCOM—21st Conference on Computer Communications*, New York, USA, March 23-25, pp. 744-751.

[37] Ramamurthy, S. and Mukherjee, B., 1999. Survivable WDM mesh networks, Part II—restoration, *19th IEEE International Conference on Communications*, Vancouver, Canada, June 6-10, pp. 2023-2030.

[38] Gerstel, O. and Ramaswami, R., 2000. Optical layer survivability—an implementation perspective, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18, 1885-1899.

[39] Gerstel, O. and Ramaswami, R., 2000. Optical layer survivability—a service perspective, *IEEE Communications Magazine*, 38, 104-113. 96

[40] Sahasrabudde, L., Ramamurthy, S. and Mukherjee, B., 2002. Fault management in IP-over-WDM networks: WDM protection versus IP restoration, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20, 21-33.

[41] Modiano, E. and Narula-Tam, E., 2002. Survivable lightpath routing: a new approach to the design of WDM-based networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20, 800-809.

[42] Wang, J., Sahasrabudde, L. and Mukherjee, B., 2002. Path vs. subpath vs. link restoration for fault management in IP-over-WDM networks: performance comparisons using GMPLS, *IEEE Communications Magazine*, 40, 80-87.

[43] Sasaki, G. H. and Ching-Fong, S., 2003. The interface between IP and WDM and its effect on the cost of survivability, *IEEE Communications Magazine*, 41, 74-79.

[44] Cox, L. A. and Sanchez, J. R., 2001. Cost savings from optimized packing and grooming of optical circuits: Mesh versus ring comparisons, *Optical Networks Magazine*, 2, 72-90.

[45] Modiano, E. and Lin, P. J., 2001. Traffic grooming in WDM networks, *IEEE Communications Magazine*, 39, 124-129.

[46] Lardies, A., Gupta, R. and Patterson, R. A., 2001. Traffic grooming in a multi-layer network, *Optical Networks Magazine*, 2, 91-99.

[47] Zhu, K. and Mukherjee, B., 2002. Traffic grooming in an optical WDM mesh network, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20, 122-133.

[48] Dutta, R. and Rouskas, G. N., 2002. Traffic grooming in WDM networks: past and future, *IEEE Network*, 16, 46-56.

[49] Cinkler, T., 2003. Traffic and grooming, *IEEE Network*, 17, 16-21.

[50] Zhu, K., Zhu, H and Mukherjee, B., 2003. Traffic engineering in multigranularity heterogeneous optical WDM mesh networks through dynamic traffic grooming, *IEEE Network*, 17, 8-15.

[51] Sahasrabudde, L. and Mukherjee, B., 1999. Light-trees: Optical multicasting for improved performance in wavelength-routed networks, *IEEE Communications Magazine*, 37, 67-73.

[52] Sun, Y., Gu, J. and Tsang, D. H. K., 2001. Multicast routing in all-optical wavelength routed networks, *Optical Networks Magazine*, 2, 101-109.

[53] Chen, B. and Wang, J., 2002. Efficient routing and wavelength assignment for multicast in WDM networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20, 97-109.

[54] Yao, S., Mukherjee, B. and Dixit, S., 2000. Advances in photonic packet switching: An overview, *IEEE Communications Magazine*, 38, 84-94.

[55] Yao, S., Mukherjee, B., Yoo, S. J. B. and Dixit, S., 2001. All-optical packet switching: Challenges and opportunities, *IEEE Communications Magazine*, 39, 142-148.

[56] O'Mahony, M. J., Simeonidou, D., Hunter, D. K. and Tzanakaki, A., 2001. The application of optical packet switching in future communication networks, *IEEE Communications Magazine*, 39, 128-135.

[57] El-Bawab, T. S. and Shin, J.-D., 2002. Optical packet switching in core networks: Between vision and reality, *IEEE Communications Magazine*, 40, 60-65.

[58] Yuan, X. C., Li, V. O. K., Li, C. Y. and Wai, P. K. A., 2003. A novel self-routing address scheme for all-optical packet-switched networks with arbitrary topologies, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 21, 329-339.

[60] Qiao, C. and Yoo, M., 1999. Optical burst switching (OBS) - a new paradigm for an optical internet, *Journal on High Speed Networks*, 8, 69-84.

[60] Baldine, I., Rouskas, G. N., Perros, H. G. and Stevenson, D., 2002. Jumpstart: a just-in-time signaling architecture for WDM burst-switched networks, *IEEE Communications Magazine*, 40, 82-89.

[61] Banerjee, D. and Mukherjee, B., 1996. A practical approach for routing and wavelength assignment in large wavelength-routed optical networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 14, 903-908.

[62] Wauters, N. and Demeester, P., 1996. Design of the optical path layer in multiwavelength cross-connected networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 14, 881-892.

[63] Cinkler, T., Marx, D., Larsen, C. P. and Fogaras, D., 2000. Heuristic algorithms for joint configuration of the optical and electrical layer in multi-hop wavelength routing networks, *IEEE INFOCOM-22nd Conference on Computer Communications*, Tel-Aviv, Israel, March 26-30, pp. 1000-1009.

[64] Karasan, E. and Ayanoglu, E., 1998. Effects of wavelength routing and selection algorithms on wavelength conversion gain in WDM optical networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 6, 186-196.

[65] Xu, S., Li, L., and Wang, S., 2000. Dynamic routing and assignment of wavelength algorithms in multifiber wavelength division multiplexing networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18, 2130-2137.

[66] Kodialam, M. and Lakshman, T. V., 2001. Integrated dynamic IP and wavelength routing in IP over WDM network, IEEE INFOCOM-23rd Conference on Computer Communications, Anchorage, USA, April 22-26, pp. 358-366.

[67] Zang, H., Jue, J. and Mukherjee, B., 2000. A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks, *Optical Networks Magazine*, 1, 47-60.

[68] Mukherjee, B., 1997. *Optical Communication Networks*, McGraw-Hill, New York.

[69] Labourdette, J.-F. P. and Acampora, A. S., 1991. Logically rearrangeable multihop lightwave networks, *IEEE Transactions on Communications*, 39, 1223-1230.

[70] Ramaswami, R. and Sivarajan, K. N., 1996. Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 14, 840-851.

[71] Mukherjee, B., Banerjee, D., Ramamurthy, S. and Mukherjee, A., 1996. Some principles for designing a wide-area WDM optical network, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 4, 684-696.

[72] Banerjee, D. and Mukherjee, B., 2000. Wavelength-routed optical networks: Linear formulation, resource budgeting tradeoffs, and a reconfiguration study, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 8, 598-607.

[73] Krishnaswamy, R. M. and Sivarajan, K. N., 2001. Design of logical topologies: A linear formulation for wavelength-routed optical networks with no wavelength changers, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 9, 186-198.

[74] Dutta, R. and Rouskas, G. N., 2000. A survey of virtual topology design algorithms for wavelength routed optical networks, *Optical Networks Magazine*, 1, 73-89.

[75] Dutta, R. and Rouskas, G. N., 2000. Design of Logical Topologies for Wavelength Routed Networks, in *Optical WDM Networks: Principles and Practice*, pp. 79-102, Eds. Sivalingam, K. M. and Subramaniam, S., Kluwer Academic Publishers, Boston.

[76] Ramamurthy, B. and Ramakrishnan, A., 2000. Virtual topology reconfiguration of wavelength routed optical WDM networks, *IEEE GLOBECOM*, San Francisco, USA, November 27-December 1, pp. 1269-1275.

[77] A. Lardiés, A. Aguilar. *Planning Methodology for SDH + Optical Network*, Bélgica: Alcatel-Telecom da Espanha, 1998

[78] G. Carrasco, A. Mata, I.Garrido. *Simulated Annealing Algorithms to Access Network Planning*, Belgica: Alcatel-Telecom da Espanha, 1998

[79] E. Thibault, L. O. Barbosa, J. M. Thizy. Development of a Design Optimization Model for the National Defense Headquarters Metropolitan Area Network Backbone. Belgica, 1998

[80] M. Minoux. Network Synthesis and Optimum Network Design Problem: models, solution, methods and applications, EUA. 1989

[81] L. Berry, B. Murtagh, G. McMahon, S. Sugden. Optimization Models for Communication Network Design, Austrália: Bond University, 1998

[82] B. Gavish. Augment Lagrangian Base Algorithms for Centralized network Design. EUA: IEEE Transaction Communication, vol. 33, 1995

[83] Sreenath, N., Siva Ram-Murthy, C., Gurucharan, B. H. and Mohan, G., 2001. A two-stage approach for virtual topology reconfiguration of WDM optical networks, Optical Networks Magazine, 2, 58-71.

[84] Dijkstra, E. A note on two problems in connexion with graphs. Numerische Mathematik, 1, 269-271, 1959.

[85] Ford, L. R. e Fulkerson D. R. Flows in Networks. Princeton University Press, Princeton, 1962

[86] Jewell, W. S. Optimal flow through networks, Operations Research MIT, Cambridge, MA, 1958

[87] Iri, M. A new method of solving transportation-network problems. Journal of the Operations Research Society of Japan, 3, 27-87, 1960.

[88] Busaker, R. G. e P. J. Gowen. A procedure for determining minimal-cost network flow patterns. Operational Research Office, Johns Hopkins University, Baltimore, MD, 1961.

[89] Minty, G. J. Monotone networks. Proceedings of the Royal Society of London, 27, 194-212, 1960

[90] Fulkerson D. R.. An out-of-kilter method for minimal cost flow problems. SIAM Journal on Applied Mathematics 9, 18-27, 1961.

[91] A. Ashtiani, H. A. e T. L. Magnanti. Implementing primal-dual network flow algorithms. Technical Report, Operations Research Center, MIT, Cambridge, MA, 1976

[92] Klein, M. A primal method for minimal cost flows with application to the assignment and transportation problems. Management Science 14, 205-220, 1967.

[93] Barahona, F. e É. Tardos. Note on Weintraub's minimum cost circulation algorithm. SIAM, Journal on Computing 18, 579-583, 1989.

[94] Goldberg, A. V. e Tarjan R. E. Finding minimum –cost circulations by canceling negative cycles. Proceedings of the 20th ACM Symposium on the Theory of Computing, 1988

[95] Wallacher, C. e Zimmermann U. T. A combinatorial interior point method for network flow problems. Presented at the 14th International Symposium on Mathematical Programming, Amsterdam, 1991.

[96] Bertsekas, D. P. e P. Tseng. Relaxation methods for minimum cost ordinary and generalized network flow problems. Operations Research 36, 93-114, 1988.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)