

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.

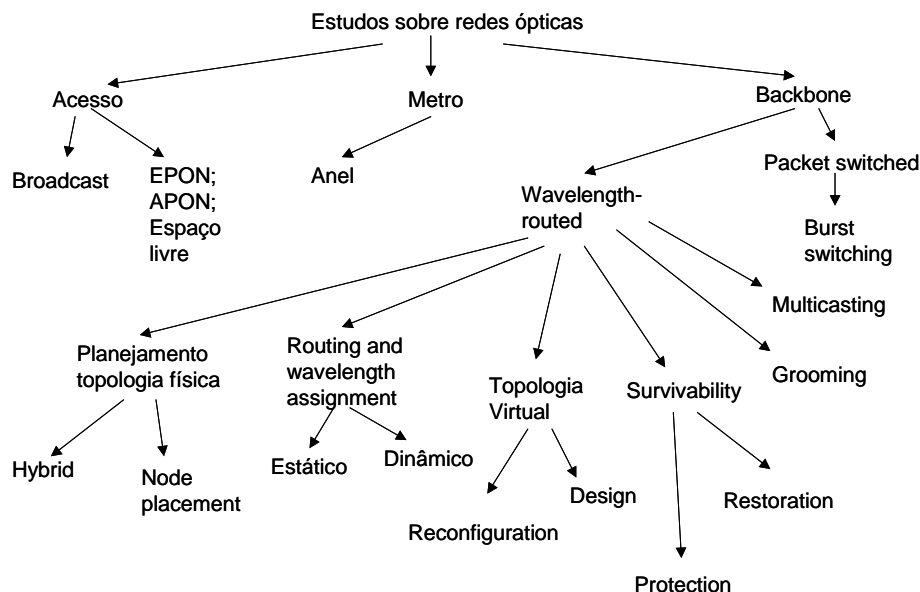


Figura 9 – Classificação dos estudos sobre rede óptica

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*, *deBruijn*, *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 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 consequência, 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 (ópticas / 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.