

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Devido à ascensão da Internet, já é possível se comunicar praticamente com qualquer parte do mundo instantaneamente a custos relativamente baixos, fazer negociações comerciais de forma segura, prática e rápida, e até mesmo prover uma relação mais transparente entre o governo e o cidadão. Com o aparecimento e massificação desses vários novos serviços que fazem requisição de voz, vídeo e até televisão através da rede, há uma necessidade crescente que as chamadas Redes de Próxima Geração sejam capazes de dar suporte a essa heterogeneidade do tráfego com a Qualidade de Serviço (QoS – *Quality of Service*) exigida por cada aplicação. De uma forma geral, a QoS é tipicamente definida como uma especificação de desempenho de um sistema de comunicação e é, na maioria das vezes, quantitativamente representada por parâmetros que podem envolver várias camadas do modelo OSI (*Open System Interconnection*).

Já a QoS óptica em redes ópticas pode ser classificado de acordo com a capacidade da rede prover às suas redes clientes caminhos ópticos com: requisitos funcionais, diferenciação de QoS óptica e/ou Qualidade de Transmissão (QoT – *Quality of*

Transmission). QoS está relacionada às degradações da Relação Sinal Ruído Óptica (OSNR – *Optical Signal Noise Ratio*) dos caminhos ópticos impostas pelos efeitos da camada física, como por exemplo: atenuação, dispersão cromática, etc. Como neste trabalho são avaliados os efeitos causados pelos elementos da camada física na transmissão do sinal, quando se tratar de QoS, será considerado portanto a QoS.

A Internet continua crescendo em largura de banda, número de usuários e complexidade, e já é possível visualizar as limitações dos sistemas de comunicação óptica baseadas nas tecnologias disponíveis [RAMASHWAMI, 2002]. Diante disso, as redes de comunicações ópticas são as únicas com largura de banda suficiente para suportar o volume de tráfego exigido com a consolidação dessas aplicações, caso ele continue crescendo no ritmo atual.

O problema é que a grande maioria dos sistemas ópticos atualmente em operação utiliza o protocolo SDH/SONET (*Synchronous Digital Hierarchy/Synchronous Optical Network*), adequado à transmissão do tráfego de voz por oferecer comutação por circuito e proteção. O esquema de eletrônica usado para gerenciar as transmissões pode se tornar um fator limitante para o crescimento da Internet. Isto acontece não somente por causa da necessidade de altas taxas de transmissão, as quais podem ser inviáveis de serem realizadas pela eletrônica, mas também por causa do significativo consumo de energia que os roteadores do núcleo da rede podem empregar [RAMASHWAMI, 2002].

Nesta direção, a área de comunicações ópticas, especificamente em redes, se situa hoje no centro dos esforços de construção de uma infra-estrutura de comunicação adequada para a nascente Sociedade da Informação. O Brasil tem demonstrado interesse por esta área, sendo uma das quatro grandes áreas temáticas que serão desenvolvidas pelo Projeto GIGA, sob os auspícios do Fundo de Desenvolvimento Tecnológico das Telecomunicações (Funttel), coordenado pela Fundação CPqD (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Telecomunicações e TI) e pela RNP (Rede Nacional de Pesquisa).

Outro importante projeto de *testbed* óptico brasileiro em operação é o programa TIDIA (Tecnologia da Informação e Desenvolvimento da Internet Avançada) da FAPESP

(Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo), que é um ambiente projetado para realizar ensaios e testes rigorosos em grandes projetos de desenvolvimento, onde os resultados dos experimentos se aproximam da realidade de funcionamento após a implantação. Trata-se de um empreendimento estratégico para a inserção do Brasil no ambiente social, cultural e produtivo criado pelas novas facilidades de comunicação. Além desta iniciativa estatal, recentemente ocorreu um maciço investimento privado na ampliação da malha de fibras ópticas do Brasil, fazendo com que a fibra chegasse a todo o País.

Redes Ópticas Transparentes (TON – *Transparent Optical Networks*) usando Multiplexação por Divisão em Comprimento de Onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*) têm sido encaradas como uma estratégia interessante para resolver esses problemas [MARTINEZ, 2006a], [MARTINEZ, 2006b], [PINART, 2006]. Paralelamente, inúmeros avanços foram alcançados no domínio da comutação óptica e qualidade de transmissão.

Todavia, apesar de todo o avanço alcançado nestes últimos anos, ainda existem desafios a serem vencidos para a implementação em massa de TON's e conseqüentemente o uso eficiente dos recursos delas [FONSECA, 2005], como o desenvolvimento e testes experimentais de dispositivos de redes totalmente ópticos, distribuição do tráfego na rede e projeto de uma nova arquitetura de rede.

As redes totalmente ópticas também têm seus inconvenientes. Por não possuírem regeneradores, o acúmulo de penalidades causadas pela própria camada física, durante a comunicação óptica, pode degradar a transmissão de forma que a qualidade do sinal recebido seja baixa a ponto de ser inviável, pois na maioria das vezes que o sinal óptico atravessa um dispositivo, este também degrada a OSNR [CHAVES, 2008], como por exemplo acontece no Ruído de Emissão Amplificada (ASE), dos Amplificadores Ópticos à Fibra Dopada com Érbium (EDFA - *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*) [CHAVES, 2008], [DESURVIRE, 2002], [DENG, 2005] ou com a dispersão do sinal nas fibras ópticas [KAMINOW, 2002].

Há diversas alternativas para melhorar a qualidade do sinal e o desempenho do sistema. Alguns trabalhos propõem soluções a partir de algoritmos de Controle de Admissão de Chamadas integrado ao algoritmo de Alocação de Rota e de Comprimento de Onda (CAC/RWA) que levam em conta os efeitos que deterioram a qualidade do sinal transmitido, como por exemplo o ruído ASE, a Dispersão do Modo de Polarização (PMD) e a Mistura de Quatro Ondas (FWM), entre outros. Esses trabalhos podem usar monitoramento dos efeitos em tempo real ou modelos analíticos [FONSECA, 2005], [MARTINEZ, 2006a], [MARTINEZ, 2006b], [PINART, 2006], [STRAND, 2005], [HUANG, 2005], [RAMAMURTHY, 2009], [CARDILLO, 2005], [KULKARNI, 2005], [FONSECA, 2004a], [FONSECA, 2004b], [KILPER, 2004], [ALI, 2002], [LIMA, 2004], [FILHO, 2003], [DENG, 2004], [FILHO, 2007].

Em [MANOUSAKIS, 2009] é visto que como no algoritmo de roteamento estático para redes ópticas, a rota e o comprimento de onda têm que ser estabelecidas antecipadamente entre cada origem e destino, geralmente não são consideradas as interferências entre as conexões simultâneas que trafegam na mesma fibra. Então é proposto um algoritmo RWA estático baseado em algoritmo LP-relaxado, utilizado em otimização para encontrar valores de minimização e maximização, que considera os efeitos limitantes da camada física através de parâmetros como o tamanho dos enlaces, número de saltos (*hops*), a quantidade de conexões simultâneas na fibra e os equipamentos presentes no decorrer dos caminhos ópticos. Os resultados mostraram a melhoria no bloqueio no algoritmo RWA consciente quando comparado a um típico algoritmo RWA que considera prejuízos apenas na fase de pós-processamento. Um modelo de interferência desse estudo é mostrado em [MANOUSAKIS, 2008].

Uma pesquisa sobre os efeitos do impacto da PMD e da Modulação Cruzada de Fase (XPM – *Cross Phase Modulation*) em termos de Taxa de Erro de Bit (BER – *Bit Error Rate*), a uma taxa de transmissão de 10 Gbps, é apresentado em [MANOUSAKIS, 2008]. Uma abordagem analítica foi usada para encontrar a função de distribuição probabilística do ângulo entre os modos de polarização em um sinal transmitido em um sistema WDM,

o que faz a XPM ser aleatória. A intensidade da XPM é fortemente influenciada pela evolução da luz polarizada do sistema WDM. Os resultados mostram que a XPM torna a polarização independente quando o espaçamento entre os canais é grande ou quando a fibra tem um valor relativamente elevado de PMD. Assim, a combinação de não-linearidades e PMD pode limitar significativamente o desempenho de um enlace de fibra WDM.

Uma análise da probabilidade de bloqueio em redes ópticas usando algoritmos RWA's conscientes de limitações da camada física (IA-RWA – *Impairment-aware RWA*) que levam em conta os efeitos de PMD e ruído ASE é vista em [FERES, 2009]. Neste caso, os resultados apresentaram um desempenho similar entre o algoritmo proposto e o RWA tradicional quando experimentados em uma rede óptica livre de erros. Além disso, a estratégia de alocação de comprimento de onda *most-used* apresentou melhor desempenho, por reduzir a probabilidade de bloqueio.

Além das estratégias de roteamento utilizadas, o desenvolvimento das tecnologias de *hardware* e viabilidade dos equipamentos ópticos, como OXCs e OLTs, têm sido demonstrados na última década. Estudos como os realizados no projeto DICONET (*Dynamic Impairment Constraint Networking for Transparent Mesh Optical Network*) são dedicados à especificação de um plano de controle de gestão para o estabelecimento de caminhos ópticos dinâmicos [GAGNAIRE, 2009].

1.2 Proposta de pesquisa

Diante do cenário apresentado e tendo em vista os trabalhos que já vêm sendo realizados na área, esta pesquisa visa desenvolver estratégias de roteamento capazes de garantir QoS às aplicações executadas em uma rede cliente, através da transmissão óptica transparente. Se empregadas na rede, tais estratégias podem reduzir consideravelmente o custo da infra-estrutura, pois não utiliza equipamentos regeneradores, que usam conversão O-E-O; além de ampliar a gama de serviços oferecidos pelas operadoras devido à sua capacidade de suportar altas taxas de transmissão.

Desta maneira, está sendo proposto um modelo de interconexão entre a camada de rede e a camada física da rede óptica a partir da implementação de um algoritmo RWA. Tal estratégia considera o efeito da PMD, avalia o seu impacto no desempenho de uma rede óptica transparente e, com isso, busca assegurar a qualidade do sinal e evitar potenciais degradações das conexões oriundas das redes clientes, propiciando a melhor relação de compromisso entre a qualidade da transmissão e o desempenho global das redes. Modelos de avaliação do PMD em enlaces ópticos podem ser vistas em [KAMINOW, 2008], [POOLE, 1991a], [WINZER, 2003] e algumas técnicas de compensação de PMD em [KAMINOW, 2002], [CHBAT, 1999], [LANNE, 2000], [NAGEL, 2000], [LANNE, 2001], [KARLSSON, 2001], [PATSCHER, 1997], [SANDEL, 2008], [SANDEL, 1999], [NOE, 1999a], [NOE 1999b], [HINZ, 1999b], [KHOSRAVANI, 2000], [OZEKI, 1994], [MOLLER, 2000a], [MOLLER, 2000b], [YAMADA, 2001], [SCHLUMP, 1998], [BULOW, 1999].

A degradação causada pela PMD foi escolhida como foco dos experimentos porque, dentre os tipos de dispersão que o pulso pode sofrer no decorrer de uma fibra óptica, ela está mostrando ser uma séria barreira em muitos sistemas de alta velocidade operando a taxas a partir de 10 Gbps, trazendo danos ao desempenho do sistema e à qualidade do sinal.

Por causa de sua natureza complexa e aleatória, há uma grande dificuldade de prever como esse efeito de fato se comporta na rede. Diante disso, vários modelos matemáticos e estatísticos foram desenvolvidos com o intuito de quantificar a PMD [KAMINOW, 2008], [POOLE, 1986], [POOLE, 1991b], [CURTI, 1990], [FOSCHINI, 1991], [BRODSKY, 2006], [LIU, 2004], [RAMASHWAMI, 1995] inserida nos sistemas, de forma que fosse possível verificar os limites que são aceitáveis para que as aplicações enviadas pela rede tenham o desempenho acordado no Contrato de Serviço Óptico (OSLA – *Optical Service Level Agreement*) entre as redes clientes e a rede óptica.

O cenário considerado neste estudo é o de uma Rede Óptica Transparente, na qual conexões ópticas atravessam vários dispositivos totalmente ópticos e enlaces de fibra com

amplificação óptica. Para a alocação do comprimento de onda nas conexões estabelecidas na rede, usa-se a heurística *First-Fit* [ZANG, 2001]. A eficiência desse novo algoritmo IA-RWA foi avaliada usando métricas como a probabilidade de bloqueio das conexões, a Probabilidade de Violação do Limiar (TVP – *Threshold Violation Probability*) e a equidade da rede, as quais serão definidas no Capítulo 4 dessa Dissertação.

Esta dissertação está organizada da seguinte forma. No Capítulo 2 está apresentada uma visão mais detalhada sobre a arquitetura de uma rede óptica, seus componentes e limitações impostas por eles. No Capítulo 3 foi detalhada a PMD, suas formas de representação e o modelo de inclusão usado para inclusão deste parâmetro nos experimentos. Além disso, algumas deficiências de transmissão causadas por essa dispersão e exemplos de técnicas de compensação desse efeito. No Capítulo 4, há uma descrição completa do cenário utilizado, das estratégias de roteamento propostas e resultados das simulações numéricas. O Capítulo 5 contém a conclusão.

Capítulo 2

Arquitetura de Rede – Uma visão mais detalhada

Redes Ópticas surgiram originalmente a partir dos sistemas telefônicos, os quais foram projetados para transmitir sinais de voz através de uma fibra óptica (as chamadas Redes SDH/SONET - *Synchronous Digital Hierarchy/Synchronous Optical Network*). Com o crescimento acelerado de tráfego IP, estas arquiteturas de rede estão sendo utilizadas para transportar tal tráfego. Entretanto, redes SDH/SONET não serão capazes de fluir o volume de tráfego no futuro, o qual espera-se ser mais intenso e dinâmico, pois empregam muito processamento eletrônico e, com isso, criam um gargalo eletrônico. A utilização de processamento eletrônico também significa que redes SDH/SONET ainda são opacas, ou seja, são baseadas em conexões ópticas terminadas em cada nó da rede por algum tipo de equipamento que realiza conversão óptica-elétrico-óptica e vice-versa (O-E-O – *Optical-to-Electrical-to-Optical*) [RAMASHWAMI, 2002].

Os avanços nas telecomunicações e tecnologias de fabricação das fibras ópticas foram sempre ascendentes, desde a introdução dos primeiros sistemas no início de 1980. Como a tecnologia cresceu, limitar prejuízos como perda de sinal, dispersão cromática e

não-linearidades foi e continua sendo uma questão importante, já que as fibras ópticas são o meio de transmissão universal de comunicações de alta velocidade terrestre e submarino. Nesta direção, pesquisas para elaboração de arquiteturas de redes ópticas mais eficientes, flexíveis e inteligentes estão sendo feitas e a tecnologia IP sobre WDM (*Wavelength Division Multiplexing* – Multiplexação por Comprimento de Onda) está se tornando uma das candidatas mais prováveis para dar suporte a essa nova demanda de tráfego nas redes [MARTINEZ, 2006a], [MARTINEZ, 2006b], [PINART, 2006]. Redes WDM são capazes de fluir eficientemente o tráfego oriundo de várias Redes Clientes (como por exemplo, IP/MPLS e SONET/SDH); entretanto, a grande capacidade de transmissão da tecnologia WDM não pode ser completamente utilizada nas redes ópticas atualmente em operação devido à existência de conversão O-E-O, a qual causa o chamado gargalo eletrônico.

As redes Opacas possuem benefícios como regeneração elétrica do sinal e capacidade de conversão de comprimento de onda em cada salto. Todavia, possui limitações como: alto custo, não é transparente com relação à taxa de transmissão de *bit* e formato de modulação, e subutilização da capacidade de transmissão da tecnologia WDM [RAMASHWAMI, 2002]. Neste trabalho são consideradas Redes Ópticas transparentes, ou seja, que não possuem nenhum tipo de conversão eletro-óptica.

Para estabelecer uma conexão qualquer partindo de um ponto origem na Internet é necessário que se estabeleça um caminho, ou rota, formada por uma sucessão de enlaces pelos quais as informações vão trafegar até o seu destino. Por exemplo, partindo da rede cliente de origem, que pode ser uma rede IP ou MPLS, os dados são levados até a rede cliente de destino por redes ópticas, que têm o objetivo de dar suporte fornecendo-lhe caminhos ópticos (*lighpaths*), formados pelo conjunto: rota e comprimento de onda. Em cada fibra podem trafegar ao mesmo tempo vários canais ou conexões, utilizando WDM.

Como pode ser visto na Figura 2.1, as redes clientes fazem as requisições de transmissão às redes ópticas e dependendo do conteúdo ou aplicação que deve ser enviado, um diferente nível de QoT é exigido para cada conexão. Tais níveis de QoT são

acordados entre a rede óptica e as redes clientes a partir de um Contrato de Serviço Óptico (OSLA – *Optical Service Level Agreement*), no qual o desempenho desejado para cada aplicação ou classe de serviço é estabelecido a partir de parâmetros como Taxa de Erro de *Bit* (BER – *Bit Error Rate*), probabilidade de bloqueio experimentado por determinada classe de serviço na rede, entre outros [FONSECA, 2005].

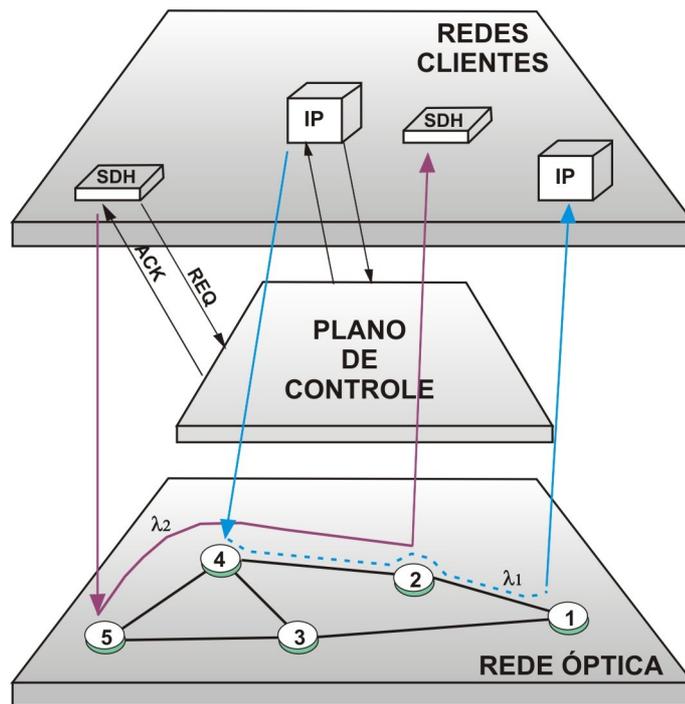


Figura 2.1: Interligação entre redes clientes e uma rede totalmente óptica.

Para isso, é necessário que exista um mecanismo de Controle de Admissão de Chamadas integrado ao algoritmo de Alocação de Rota e Comprimento de Onda (CAC/RWA - *Connection Admission Control/Routing and Wavelength Assignment*) capaz de conferir se é possível o atendimento ou não dos parâmetros presentes no OSLA, através de uma ligação direta com o Plano de Controle da rede óptica e das redes clientes, que tem como função principal configurar as conexões dinamicamente. Tal ligação é necessária, pois para verificar se a nova conexão irá afetar o desempenho de outras conexões já ativas na rede e também se a nova conexão atende aos requisitos de QoS exigidos pelo cliente, o CAC/RWA precisa conhecer, por exemplo, os estados dos enlaces por onde vai passar a

nova conexão.

2.1 Elementos de rede

Para compreender o funcionamento e efeitos que podem atingir a Rede Óptica e a QoT fornecida por ela, é importante conhecer sua arquitetura e elementos, além da forma como ela é interconectada com as redes clientes, pois sempre que o sinal óptico atravessa um dispositivo, este também degrada a relação sinal ruído óptica do sinal (OSNR – *Optical Signal Noise Ratio*) [CHAVEZ, 2008]. A seguir, são explicados os seus elementos, que estão dispostos na rede conforme apresentados na Figura 2.2 [FONSECA, 2005], que cita os seguinte efeitos: Atenuação, Dispersão do Modo de Polarização (PMD – *Polarization Mode Dispersion*), Dispersão Cromática, Mistura de Quatro Ondas(FWM - *Four-Wave Mixing*), Modulação Cruzada de Fase (XPM - *Cross-Phase Modulation*), Auto Modulação de Fase (SPM – *Self-Phase Modulation*), Interferência (*Crosstalk*), Ruído de Emissão Espontânea Amplificada (ASE - *Amplified Spontaneous Emission*), Saturação dos amplificadores..

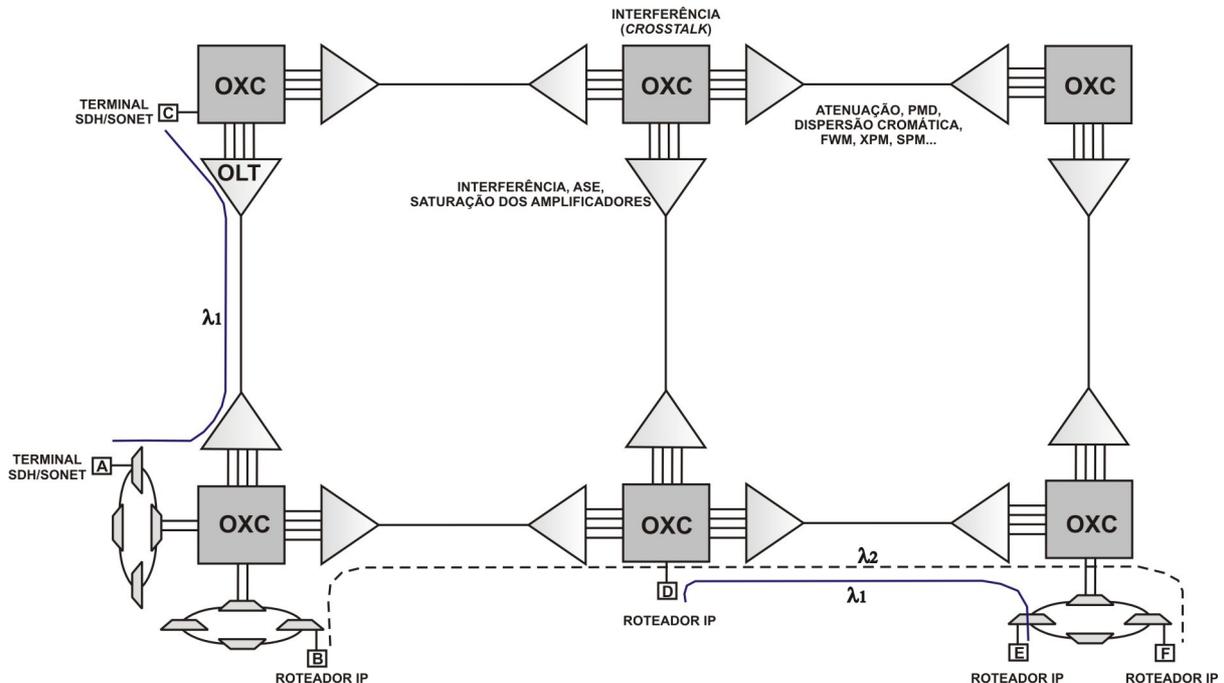


Figura 2.2: Interligação de clientes IP e SONET/SDH com a rede óptica com uma representação física dos elementos da rede óptica.

2.1.1 Terminais Ópticos de Linha

Para fazer a multiplexação e demultiplexação dos canais em um sistema WDM são utilizados os Terminais Ópticos de Linha (OLT – *Optical Line Terminals*). Além dos multiplexadores/demultiplexadores, sua estrutura também possui *transponder*, que serve para adequar o sinal vindo da rede cliente para um formato adequado a um sistema WDM e vice-versa, de acordo com a norma da ITU [FONSECA, 2005], além de outras funções como inserir códigos corretores de erro (FEC - *Forward Error Correction*), e opcionalmente, ter amplificadores ópticos, como mostrado na Figura 2.3. Por esses motivos, o custo do OLT é relativamente alto, correspondendo a uma significativa porção do custo do sistema.

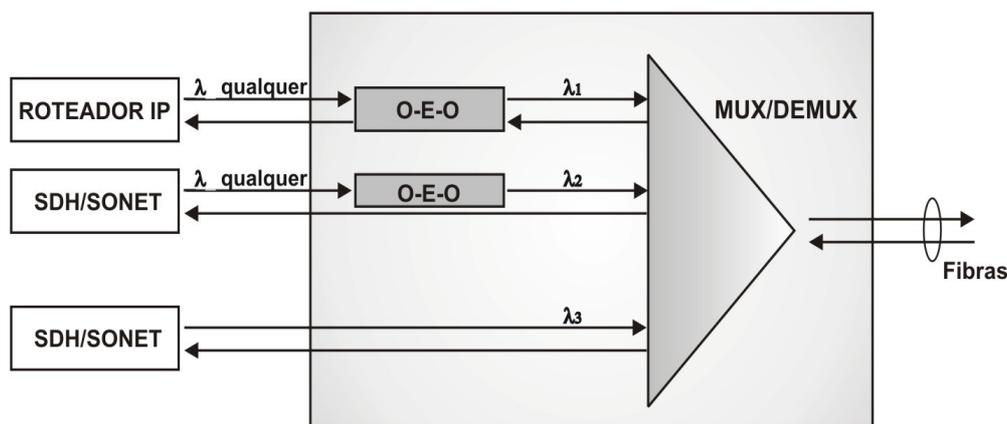


Figura 2.3: Diagrama de blocos de um OLT.

2.1.2 Multiplexadores Ópticos de Entrada e Derivação

Quando recebem vários sinais com comprimentos de ondas diferentes, os Multiplexadores Ópticos de Entrada e Derivação (OADM – *Optical Add/Drop Multiplexers*) seletivamente derivam alguns comprimentos de onda enquanto deixam passar os demais. Também tendo a possibilidade de adicionar novos canais à rede. Percebe-se que por possuírem apenas dois portos troncos, os quais fornecem a entrada/saída para a fibra, os OADMs são utilizados sobretudo em redes ópticas com topologias lineares ou anulares. A Figura 2.4 mostra duas arquiteturas desse equipamento.

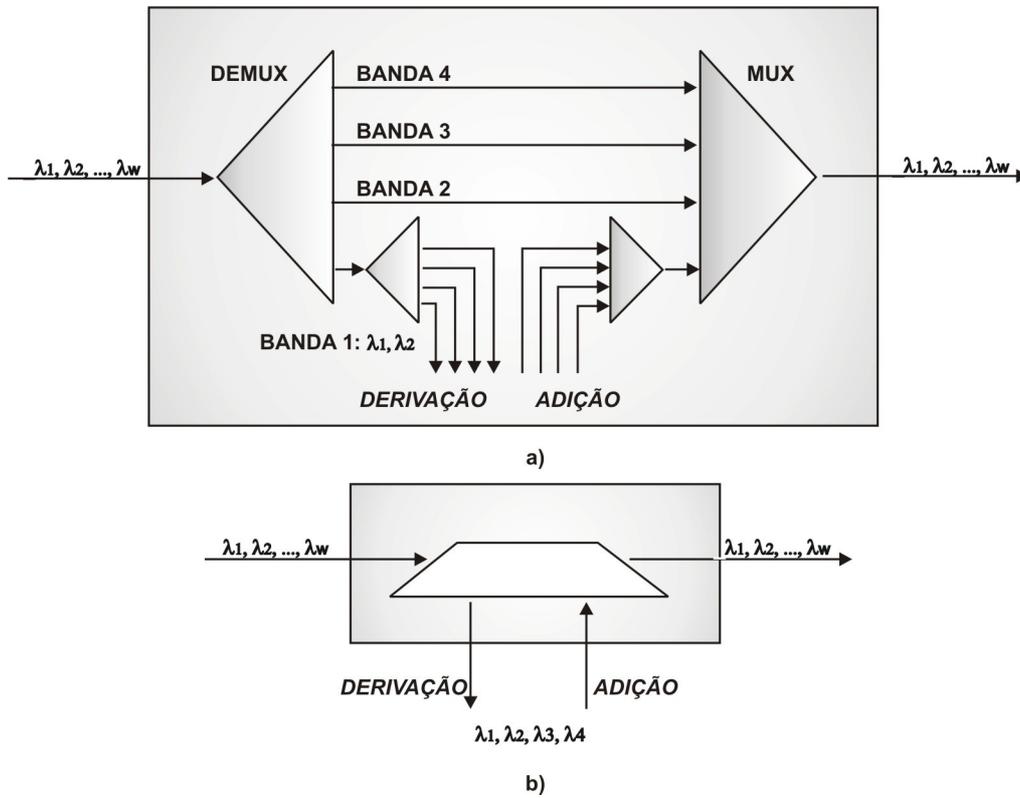


Figura 2.4: Arquiteturas de OADMs. a) Arquitetura paralela b) Arquitetura serial.

Além de poder ser usado em ambas as arquiteturas de rede linear ou em anel, na prática, opera tanto no modo fixo quanto no modo reconfigurável. Em OADMs fixos, a adição ou derivação de canais é pré-determinada e só pode ser reorganizada manualmente após a instalação. Em OADMs reconfiguráveis, os canais passam de forma transparente através do nó, podendo ser dinamicamente reconfiguradas conforme exigido pela rede. Estas são estruturas mais complexas, mas mais flexíveis porque provêem um pedido de provisionamento sem intervenção manual e, portanto, podem ser criados imediatamente. A redução de conversões eletro-ópticas desnecessárias através do uso de OADMs apresenta significativa redução de custos na rede.

Um OADM reconfigurável pode ser dividido em duas categorias: com arquitetura parcialmente reconfigurável e com arquitetura totalmente reconfigurável. Em parte, arquitetura reconfigurável, possui capacidade de selecionar os canais de entrada e

derivação, mas tem também uma matriz de conectividade pré-determinada, que restringe a função de alocação de comprimento de onda. No caso do OADM totalmente reconfigurável, tem a capacidade de selecionar os canais a serem adicionados ou removidos, mas ele também oferece conectividade através dos portos troncos, o que permite uma flexibilidade de atribuição de comprimento de onda com o uso de transmissores e receptores sintonizáveis. Os OADMs reconfiguráveis podem ser divididos em duas gerações principais. O primeiro é aplicado principalmente em configurações de rede linear e não fornece proteção do caminho óptico, enquanto o segundo é aplicado nas configurações da rede em anel e fornece a proteção da camada óptica.

2.1.3 Chaves Ópticas

Os equipamentos responsáveis por executar todas as funções de roteamento dos caminhos ópticos, e também estabelecimento e terminação deles, são as chamados Chaves Ópticas (OXC - *Optical Crossconnect*), imprescindíveis para se construir redes ópticas em malha, já que os OADMs são utilizados apenas em topologias lineares e anulares.

Na sua arquitetura, mostrada na Figura 2.5, as fibras de chegada são conectadas as fibras de saída, cada uma delas com um número W de comprimentos de onda, sendo utilizada a mesma quantidade na entrada e saída para cada caminho óptico estabelecido. O núcleo do equipamento pode ser elétrico ou óptico, sendo necessária a conversão eletro-óptica em alguns casos. Porém, neste trabalho são considerados OXCs completamente ópticos, sem nenhum tipo de conversão. Dispõe também de um elemento gerenciador da rede, responsável por todo controle e gerenciamento de dispositivos dinâmicos que possam vir a existir [FONSECA, 2005].

Dentre as suas funcionalidades, podemos citar:

- Aprovisionamento de serviços;
- Proteção contra falhas;
- Transparência à taxa de *bits*;

- Monitoramento de desempenho;
- Acesso a testes;
- Localização de falhas;
- Conversão de comprimento de onda e;
- Agregação de tráfego.

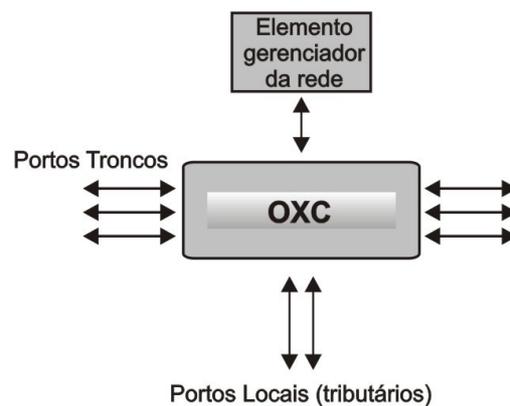


Figura 2.5: Diagrama de blocos do OXC.

2.1.4 Amplificadores Ópticos

Para compensar as perdas devido à atenuação imposta pela fibra óptica ou as perdas nos OXCs ao injetar potência a um sinal na entrada da fibra, são utilizados os Amplificadores Ópticos. No decorrer do caminho óptico, o sinal pode chegar a um nível de atenuação tão baixo que o receptor pode não mais ser capaz de detectá-lo, sendo os amplificadores imprescindíveis principalmente para enlaces de longas distâncias. Porém, é importante frisar que o próprio amplificador também possui desvantagens, pois também injeta degradações nos caminhos ópticos, como ruídos e interferências, assim como todos os equipamentos envolvidos na transmissão [CHAVES, 2008].

Como exemplo, podemos citar Amplificadores Ópticos à Fibra Dopada com Érbio (EDFA - *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*), Amplificadores Raman e Amplificadores Paramétricos. Outra forma de amplificação óptica é por meio de Amplificadores Ópticos Semicondutores (SOA - *Semiconductor Optical Amplifiers*), entretanto SOAs são mais

utilizados em dispositivos fotônicos, como por exemplo, conversores de comprimento de onda.

O tipo mais usual de amplificadores ópticos são os EDFAs [DESURVIRE, 2002], os quais são mais utilizados na banda C do espectro eletromagnético (1530 – 1565 nm); embora já existam EDFAs que trabalham na banda L (1565 – 1625 nm). Por possuírem uma largura de banda da ordem de 4 Thz (apenas para a banda C), sendo capazes de amplificar vários canais ao mesmo tempo, prover transparência com relação à taxa de *bits* e formato de modulação, os EDFA's foram os principais responsáveis pela implementação prática e viabilidade econômica dos sistemas WDM [FONSECA, 2005].

Nos EDFAs, os três principais tipos de degradação são o Ruído de Emissão Espontânea Amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*), a saturação do ganho e a saturação do ruído ASE [CHAVES, 2008]. O primeiro é devido ao decaimento espontâneo dos íons de Érbio no meio ativo do amplificador, este processo de emissão espontânea emite fótons de mesma frequência do sinal óptico de interesse mas com direção, polarização e fase aleatórias. Sendo assim, insere uma determinada quantidade de ruído ao sistema, a qual pode ser medida em termos de potência óptica do ruído ASE, que é dada pela equação (2.1), que pode ser verificada na seção 2.2.1.1, onde este efeito está descrito mais detalhadamente.

2.1.5 Fibra Óptica Monomodo

O que difere um tipo de fibra dos outros são seus perfis de índice de refração e dispersão cromática, principalmente, com base nisso os processos de fabricação atuais também têm a preocupação com a atenuação as não-linearidades dos sistemas de comunicações ópticas. Os principais tipos de fibras utilizadas em redes ópticas são: Fibra Óptica Padrão (STDF - *Standard Fiber*), Fibra de Dispersão Deslocada (DSF - *Dispersion Shifted Fiber*) e Fibra de Dispersão Não-Nula (NZDF - *Non Zero Dispersion Fiber*).

Enquanto a fibra STDF apresenta comprimento de onda de dispersão nula por volta de 1310 nm e uma dispersão da ordem de 17 ps/(nm.km) na janela de 1550 nm, a fibra DSF

apresenta dispersão nula na janela de 1550 nm e a fibra NZDF possui um perfil de dispersão variando de 2 - 8 ps/(nm.km) na banda C (1530 – 1565 nm), porém existem vários outros tipos de fibra, dos quais alguns serão comentados abaixo [FONSECA, 2005].

Apesar da fibra DSF apresentar dispersão nula na janela de 1550 nm de comprimento de onda, redes WDM que utilizam esse tipo de fibra têm o desempenho limitado devido a severas penalidades causadas por efeitos como Mistura de Quatro Ondas (FWM – *Four-Wave Mixing*), Dispersão de Modo de Polarização (PMD – *Polarization Mode Dispersion*), dentre outros. Porém, essas penalidades são reduzidas se uma pequena dispersão cromática estiver presente na fibra, por causa das diferentes interações de ondas que viajam com velocidades de grupo diferentes. Isto levou ao desenvolvimento de fibras de dispersão não-nula (NZDF). Essas fibras têm uma dispersão cromática entre 2 e 8 ps/(nm-km), ou entre -2 e -8 ps/(nm-km), para a faixa de comprimento de onda de 1550 nm. Isso reduz as penalidades causadas pelos efeitos degradantes, mantendo a maior parte das vantagens que a DSF oferece. Esta fibra está sendo usada em muitos enlaces de longa distância recém-construídos na América do Norte.

Uma vez que todas as fibras NZDF são projetadas para ter um valor um pouco diferente de zero na dispersão da banda C, seu comprimento de onda de dispersão nula está fora da banda C, podendo estar na banda L ou S. Nesse caso, é importante lembrar que uma grande parte da faixa em torno do comprimento de onda onde a dispersão é nula torna-se inutilizável devido à FWM, por exemplo. Porém existem fibras NZDF com um comprimento de onda de dispersão nula que se situa abaixo de 1440 nm e, portanto, podem ser utilizadas em todas as três bandas, como a fibra *TeraLight*, utilizadas pela Alcatel [RAMASHWAMI, 2002].

Os efeitos das não-linearidades também podem ser reduzidos através da concepção da chamada Fibra de Grande Área Efetiva. Verifica-se que pelo fato das fibras de dispersão nula terem um pequeno valor da dispersão cromática na banda de 1550 nm, para minimizar os efeitos da dispersão cromática, têm também uma menor área efetiva para a transmissão.

No intuito de reduzir as não-linearidades, também foram desenvolvidas NZDF com uma grande área efetiva, de mais de $70 \mu\text{m}^2$, o que se compara a aproximadamente $50 \mu\text{m}^2$ para uma típica NZDF e a $85 \mu\text{m}^2$ para a fibra monomodo padrão. Dessa forma, elas alcançam uma melhor relação de compromisso entre a dispersão cromática e não-linearidades. No entanto, a desvantagem é que estas fibras têm uma inclinação maior à dispersão cromática, cerca de $0,11 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km}^2)$, em comparação a $0,07 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km}^2)$ para outras NZDF, o que também é prejudicial à qualidade da transmissão. Outra vantagem é que uma grande área efetiva também reduz a eficiência da distribuição da amplificação Raman [RAMASHWAMI, 2002] (ver Seção sobre efeito ASE, 2.2.1.1).

Na figura 2.6, vemos que numa típica fibra de grande área efetiva a região central é constituída por três partes. Na parte anelar do meio, o índice de refração é igual ao do revestimento, enquanto a parte mais externa do núcleo é uma região anelar de maior índice de refração. Dessa maneira, como a parte central do núcleo é uma região de menor índice de refração, não confina a potência que, portanto, é distribuída sobre uma área maior, o que reduz o pico de potência no núcleo e aumenta a área efetiva da fibra.

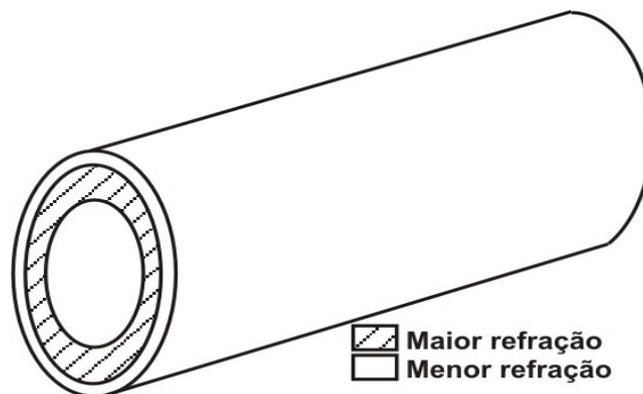


Figura 2.6: Fibra de grande área efetiva.

As fibras podem ser projetadas para ter dispersão cromática positiva ou negativa na banda C. Para os sistemas terrestres são utilizadas as de dispersão cromática positiva e em sistemas submarinos as de dispersão cromática negativa [RAMASHWAMI, 2002]. Ambas as dispersões cromáticas, positiva e negativa, causam espalhamento do pulso e a

quantidade desse espalhamento depende apenas da magnitude da dispersão cromática, e não do seu sinal.

A necessidade de fibras com diferentes sinais de dispersão cromática, positivos para os sistemas terrestres e negativos para enlaces submarinos, são devido a um efeito não-linear conhecido como instabilidade da modulação. Quando a compressão de um pulso emitido positivamente ocorre, a dispersão cromática é positiva e a Auto Modulação de Fase (SPM – *Self-Phase Modulation*) causa emissão positiva de pulsos. Com os níveis de potência altos, a interação entre estes dois fenômenos leva a um rompimento de um pulso relativamente amplo (que dura em torno de 100 ps, o que corresponde a cerca de 10 Gbps de transmissão) em um fluxo de pulsos curtos (duração de poucos picossegundos). Este fenômeno leva a uma taxa significativamente maior de erro de *bit* [RAMASHWAMI, 2002].

A instabilidade de modulação ocorre somente em fibra de dispersão cromática positiva e, portanto, pode ser evitada pelo uso de fibra de dispersão cromática negativa. Seus efeitos em fibra de dispersão cromática positivos podem ser minimizados através de níveis mais baixos de energia.

Como nas fibras de dispersão cromática positiva a dispersão nula encontra-se abaixo da faixa de 1550 nm, os sistemas terrestres podem ser atualizados para usar a banda L (1400 a 1725 MHz), o que é uma característica importante. Por isso, a fibra de dispersão cromática positiva é a preferida para os sistemas terrestres, e os níveis de potência são controlados de modo que a instabilidade da modulação não seja significativa. Já para os enlaces submarinos, o uso de níveis mais elevados de potência é muito importante devido aos seus comprimentos muito longos, além de não poderem ser atualizados de qualquer maneira. Como são enterrados no fundo do oceano e por isso o uso futuro da banda L nessas fibras não é possível. Então as fibras de dispersão cromática negativa são usadas para enlaces submarinos [RAMASHWAMI, 2002].

Avanços nas técnicas de fabricação, que inicialmente levaram à diminuição da birrefringência intrínseca da fibra, permitiram também uma diminuição significativa no

valor da PMD. De forma que a implantação dessas fibras com baixa sensibilidade à PMD é a maneira mais simples e menos onerosa de reduzir os prejuízos causados por este outro tipo de degradação. Por exemplo, as rotas que possuem fibras com Atraso Médio Diferencial de Grupo (DGD – *Differential Group Delay*) de menos de 2% da taxa de *bits* utilizada tem suficientemente baixa PMD para os sistemas atuais, bem como a próxima geração de sistemas, assumindo que as taxas de *bit* vão aumentar numa escala exponencial, o que é um benefício muito importante já que o valor do DGD é diretamente proporcional ao comprimento do enlace [KAMINOW, 2002]. Essa diminuição da sensibilidade à PMD é indicada pelo fabricante através do componente D_{PMD} , valor que pode variar entre 0,1 e 2 ps/\sqrt{km} , sendo que quanto menor o valor mais resistente a fibra é a este tipo de dispersão.

Abaixo pode-se verificar a lista de alguns dos efeitos limitantes da capacidade de transmissão na fibra, incluindo os que já comentamos nesta seção, dos quais alguns serão descritos mais detalhadamente na seção seguinte:

2.1.5.1 Efeitos lineares

- Atenuação;
- Dispersão Cromática;
- Dispersão de Modo de Polarização (PMD).

2.1.5.2 Efeitos não-lineares

- Mistura de Quatro Ondas (FWM);
- Modulação Cruzada de Fase (XPM);
- Auto Modulação de Fase (SPM);
- Instabilidade Modulacional (MI – *Modulation Instability*);
- Espalhamento Estimulado de Raman (SRS – *Stimulated Raman Scattering*);
- Espalhamento Estimulado de Brillouin (SBS – *Stimulated Brillouin Scattering*);

- Auto-desvio de frequência;
- *Self-Steepening*.

2.2 Limitações impostas pelos elementos da rede

As redes totalmente ópticas possuem vários fatores que podem afetar a QoT, a medida que o sinal trafega, além das interferências do meio em que se encontra, sofre também com efeitos degradantes causados pelos próprios dispositivos que as compõem. Estas limitações podem ser divididas em duas categorias: efeitos inerentes à escolha da rota e efeitos inerentes à escolha do comprimento de onda.

2.2.1 Efeitos inerentes à escolha da Rota

Nesta seção estão explicados detalhadamente alguns dos efeitos da camada física que são causados em consequência à escolha de rotas na rede.

2.2.1.1 Ruído de Emissão Espontânea Amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*)

Este tipo de ruído ocorre em EDFAs, que para amplificar o sinal de frequência f , utilizam o processo de clonagem dos fótons, os quais possuem a mesma energia, direção, polarização e fase que os fótons originais, o que chamamos de emissão estimulada, viabilizando assim a amplificação óptica.

Junto com a emissão estimulada, há uma emissão espontânea de sinal na mesma frequência, mas com energia, direção, polarização e fase aleatórias, o que é tratado como ruído e afeta todas as conexões que passam por este amplificador, o qual pode ser medido em termos de potência óptica do ruído ASE, dada por [CHAVES, 2008]:

$$P_{ASE} = 2h\nu \Delta\nu n_{sp}(G-1) \quad (2.1)$$

Em que h é a constante de Plank, ν é a frequência do sinal considerado, $\Delta\nu$ é a largura de banda óptica do canal amplificado, n_{sp} o fator de inversão de população do amplificador e G o ganho do mesmo. A potência do ruído ASE pode ser modelada de outras formas, mas como não é o foco deste trabalho, a equação 2.1 satisfaz a intenção de ilustrar quais são os fatores podem influenciar o desempenho dos amplificadores EDFAs.

Ao longo dos enlaces, esse ruído também é amplificado, o que pode vir a gerar a saturação dos amplificadores ópticos, limitando o número de saltos que uma requisição pode ter. Esse efeito também faz com que as conexões mais longas tenham uma alta probabilidade de bloqueio, quando considerada a QoT.

2.2.1.2 Dispersão cromática

Dispersão é o nome dado a qualquer efeito em que diferentes componentes do sinal transmitido trafegam em velocidades diferentes na fibra, chegando em tempos diferentes no receptor. Como consequência desse efeito, o pulso de sinal lançado chega distorcido no receptor, levando à penalidades de potência. Além disso, a dispersão é um efeito cumulativo, ou seja, quanto maior o enlace, maior a quantidade de dispersão.

Várias formas de dispersão podem surgir em sistemas de comunicações ópticas. Os mais importantes são a dispersão intermodal, a dispersão do modo de polarização e a dispersão cromática. A dispersão intermodal surge apenas em fibra multi-modo, onde os diferentes modos de propagação viajam com velocidades diferentes. O comprimento do enlace em um sistema multimodal é geralmente limitado pela dispersão intermodal e não pela perda. Porém, como este não é um problema das fibras monomodo, que são o tipo considerado neste estudo, não é aprofundada a explicação sobre este tipo de efeito dispersivo [RAMASHWAMI, 2002].

No caso da dispersão cromática, que por ter um profundo impacto na transmissão em fibras monomodo, muitas vezes é mencionada apenas pelo termo “dispersão”, há uma variação da velocidade de propagação das diversas componentes espectrais, ou

comprimentos de onda do sinal que trafega pela fibra óptica, já que o índice de refração da sílica, material que a compõe, é diferente para cada frequência transmitida, além das diferenças entre os índices do núcleo e da casca. O efeito conjunto dessas dispersões, de primeira e segunda ordem, resultam em um alargamento temporal, diminuição da amplitude e distorção da forma do pulso no decorrer de sua propagação.

As limitações de transmissão impostas pela dispersão cromática podem ser modeladas de acordo com o espalhamento do pulso, devido a este efeito ser inferior a uma fração do período de 6 *bits*, que foi determinada pela ITU (G.957) e Telcordia (BR-253), para uma penalidade de 1 dB ($\epsilon = 0,306$) e 2 dB ($\epsilon = 0,491$). Se D é a dispersão cromática da fibra no comprimento de onda utilizado, B é a taxa de *bit*, $\Delta\lambda$ a largura espectral do sinal transmitido, e L o comprimento do enlace, esta limitação pode ser expressa como [RAMASHWAMI, 2002]:

$$|D|LB(\Delta\lambda) < \epsilon \quad (2.2)$$

D é geralmente especificado na unidade ps/(nm-km). Sendo ps a unidade de medida do tempo de propagação do pulso, nm da largura espectral do pulso e km correspondente ao comprimento do enlace. Para fibra monomodo padrão, o valor típico de D na banda C é de 17 ps/(nm-km). Para este valor de D , $\lambda = 1550$ nm e $\epsilon = 0,491$ (2dB de penalidade), temos a condição de $BL < 29$ (Gbps)-km. Assim, mesmo com uma taxa de *bit* de 1 Gbps, o comprimento do enlace é limitado a 30 km, o que é uma limitação grave. Isto ilustra a importância de usar métodos de compensação ao efeito dispersivo, como a fabricação de novos tipos de fibra, as quais possuem perfis diferentes quanto à sensibilidade aos diversos tipos de dispersão, como visto na Seção 2.1.5.

2.2.1.3 Dispersão de modo de polarização (PMD – *Polarization-Mode Dispersion*)

A energia do sinal em um dado comprimento de onda é composta por dois modos de polarização ortogonais com velocidades de propagação ligeiramente diferentes, o que causa sérias deteriorações na capacidade de transmissão dos sistemas, incluindo o espalhamento de pulso. Esse efeito pode ser comparado com o da dispersão cromática, cujo fenômeno é relativamente estável. Em contrapartida, a PMD de fibras ópticas monomodo em qualquer comprimento de onda do sinal é instável, forçando os projetistas de sistemas a fazer as previsões estatísticas no sistema de transmissão digital.

A PMD é causada pela assimetria no eixo de diâmetro do núcleo (seção transversal elipsoidal ao invés de circular) resultante do processo de fabricação, por tensão externa na instalação dos cabos ou até mesmo pela dilatação causada pela temperatura. Nos sistemas convencionais a PMD não é relevante, mas nos sistemas que possuem DWDM (WDM Densa) que utilizam comprimentos de ondas próximos e a alta taxa de transmissão, a PMD se torna um fator limitante especialmente em relação à taxa de transmissão [FONSECA, 2005]. Este tipo de distorção será descrita com mais detalhes no capítulo 3.

2.2.2 Efeitos inerentes à escolha comprimento de onda

Nesta seção estão explicados detalhadamente alguns dos efeitos da camada física que são causados em consequência à escolha do comprimento de onda das rotas na rede.

2.2.2.1 Saturação dos amplificadores ópticos

O efeito da saturação de um amplificador causa a diminuição de seu ganho, que ocorre a partir de uma certa potência de entrada. Assim, à medida que o número de conexões que passam por um dado amplificador na rede vai aumentando, o amplificador se aproxima do ponto de saturação.

Em um dado momento, a ativação de uma nova requisição levará o amplificador à saturação, com a conseqüente diminuição do ganho experimentado, afetando não só essa nova conexão, mas também todas as outras conexões que passam por esse amplificador. Em outras palavras, o efeito de saturação de um amplificador se comporta como um efeito não-linear. Este efeito de saturação de amplificadores pode levar também à formação de laços de instabilidade de potência na rede óptica [DENG, 2005].

2.2.2.2 Modulação cruzada de fase (XPM - *Cross-Phase Modulation*)

A não-linearidade do índice de refração de um meio pode acoplar dois campos eletromagnéticos sem causar transferência de energia entre eles. Este efeito é denominado modulação de fase cruzada. Ela ocorre devido à dependência do índice de refração do meio com as amplitudes do próprio campo – este efeito é conhecido por Auto Modulação de Fase (SPM – *Self-Phase Modulation*) e sempre acompanha o XPM – e de outros campos propagando no mesmo meio [FONSECA, 2005].

2.2.2.3 Mistura de quatro ondas (FWM - *Four-Wave Mixing*)

É formada pela geração de novas frequências a partir da interação entre as frequências (canais) que estão se propagando pela fibra. Esses canais, mediados pelas propriedades não-lineares da fibra, fornecem parte de sua energia para a geração de sinais em novas frequências. É um dos fatores que mais afeta sistemas DWDM e ocorre em comprimentos de onda de baixa dispersão. O efeito é tão mais alto quanto mais próximos os canais estiverem do comprimento de onda para o qual a dispersão é nula (λ_0). A interação de dois ou mais canais leva à geração de luz em novos comprimentos de onda que não aqueles injetados na fibra.

Este efeito pode penalizar o sistema de duas formas. Primeiro, o sinal injetado perde potência para os novos comprimentos de onda gerados e a potência total perdida se

reflete em penalidade para o sistema. Segundo, quando a nova radiação gerada apresenta comprimento de onda coincidente com canais já existentes, que correspondem a sinais injetados na fibra. Assim, a penalidade advém de um ruído adicionado ao sinal por canais adjacentes [FONSECA, 2005].

2.3 Sumário

Neste capítulo foram vistos alguns dos conceitos e definições que serão utilizados ao longo do trabalho. Foram apresentados os principais equipamentos e organização deles na arquitetura de uma rede óptica, além de algumas limitações impostas por eles. Dessa forma, é possível compreender a necessidade de um controle de tráfego associado com um algoritmo RWA, para prover a QoT. Também foi discutido brevemente o relacionamento entre a rede óptica e as redes clientes através de um plano de controle. No capítulo 3, será dado ênfase à Dispersão de Modo de Polarização, que é o efeito investigado pelo algoritmo proposto nesta Dissertação.

Capítulo 3

Dispersão de Modo de Polarização – PMD

Como acontece com outros tipos de efeitos degradantes do meio físico, a PMD rende esforços de pesquisadores do mundo inteiro interessados em questões práticas de como esse efeito realmente se comporta na rede. Devido à sua natureza complexa e aleatória, ela está provando ser um sério obstáculo em muitos sistemas de alta velocidade operando a taxas a partir de 10 Gbps. Por esse motivo, dentre os tipos de dispersão que o pulso pode sofrer quando se propaga por uma fibra óptica, a PMD é uma das que mais pode trazer danos ao desempenho do sistema e à qualidade do sinal.

A energia do sinal em um dado comprimento de onda é composta por dois modos de polarização ortogonais que trafegam na fibra com velocidades de propagação ligeiramente diferentes, o que causa sérias deteriorações na capacidade de transmissão dos sistemas, incluindo o espalhamento de pulso, como pode ser visto na Figura 3.1. Esse efeito pode ser comparado com o da dispersão cromática, cujo fenômeno é relativamente estável. Porém devido ao seu comportamento instável no decorrer de cada enlace, em

qualquer comprimento de onda, força os projetistas de sistemas ópticos a fazerem as previsões estatísticas no sistema de transmissão digital, que são comumente modeladas como uma variável aleatória com distribuição de probabilidade Maxwelliana [RAMASHWAMI, 2002].

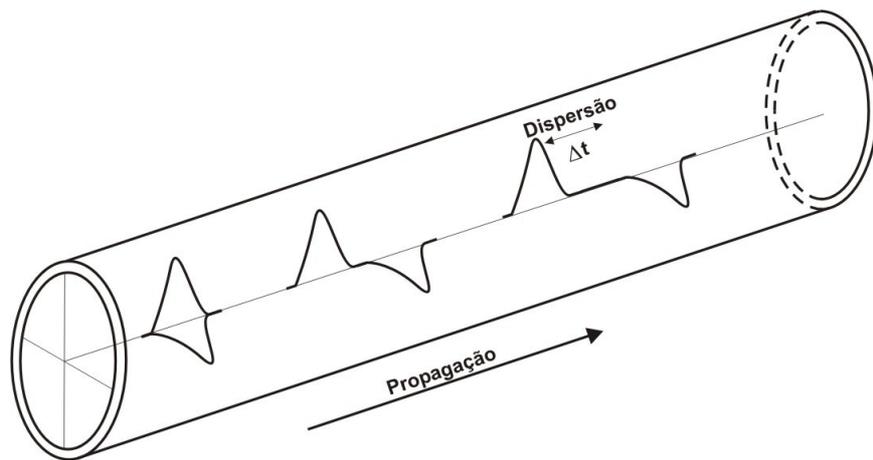


Figura 3.1: Dispersão de Modo de Polarização.

A PMD é causada pela assimetria no eixo de diâmetro do núcleo (seção transversal elipsoidal ao invés de circular) resultante do processo de fabricação, por tensão externa na instalação dos cabos ou até mesmo pela dilatação causada por altas temperaturas. Nos sistemas convencionais a PMD não é tão relevante, mas nos sistemas DWDM (WDM Densa) que utilizam comprimentos de ondas próximos e altas taxas de transmissão, ela se torna um fator limitante.

No caso de uma fibra óptica perfeitamente simétrica e sem agressões externas, esses dois modos de polarização têm a mesma velocidade de propagação, ou seja, o mesmo índice de refração para as duas polarizações. Porém, em um cenário real de fibras assimétricas, os índices de refração passam a depender da orientação da polarização da luz em relação ao eixo principal da fibra, apresentando assim uma birrefringência, cuja derivação determina a PMD de uma fibra. Por esse motivo, os modos de polarização viajam com velocidades de propagação ligeiramente diferentes entre si e além disso, também fazem com que a distribuição da energia do sinal nos modos de propagação varie

suavemente com o tempo [RAMASHWAMI, 2002]. Esse fenômeno dispersivo causa uma penalidade de potência nos sinais que se propagam pela fibra.

3.1 Representação de PMD

A PMD da fibra pode ser representada de acordo com diversas teorias. Primeiramente descrita por Poole e Wagner [POOLE, 1986], com formulação matemática [POOLE, 1991b] e por descrições estatísticas pouco tempo depois [CURTI, 1990], [FOSCHINI, 1991], porém esta é uma área que continua em contante estudo.

A partir da virada do século, o interesse foi mudando para questões mais práticas de como a PMD realmente se comporta na rede. Resultados de testes de campo em todo o mundo levaram a teoria clássica a ser modificada para o ponto de vista do comportamento da PMD nas fibras instaladas [BRODSKY, 2006].

Em [KAMINOW, 2008], uma descrição física de PMD pode ser representada pelo "*retarder plate*" ou placa de retardo, que está apresentado na Figura 3.2 (a). Neste modelo, a fibra é vista como uma série de seções birrefringentes cujas orientações (e retardo) variam aleatoriamente de uma seção para outra, devido a variações inevitáveis no decorrer da fibra. Por esse ponto de vista, o espalhamento total do pulso é a soma dos vetores aleatórios correspondentes à placa de retardo e o vetor resultante terá uma duração prevista, dada pela distribuição de Maxwell. Porém, devido à natureza aleatória, nenhuma fibra em si tem o mesmo conjunto de amostra ao longo do tempo. Isto é, as perturbações forçam o modelo mostrado na Figura 3.2 (a) variar como por exemplo o mostrado na Figura 3.2 (b). Isso leva à preocupante conclusão de que todas as fibras, mais cedo ou mais tarde, irão alcançar os limites da distribuição de Maxwell, isto é, todas as fibras "boas" um dia serão "ruins".

Esse ponto de vista leva à questionamentos como "Por quanto tempo uma fibra permanece com um determinado valor de PMD no mesmo nível?" ou "Por quanto tempo a PMD pode permanecer em níveis aceitáveis?". Uma maneira de prever analiticamente o

comportamento e limites da PMD numa rede é através da “*fast mixing assumption*” (hipótese de mistura rápida), a qual pressupõe que toda a distribuição Maxwelliana de uma rede pode ser recolhida durante algum tempo, que talvez seja no final de vários meses. Com esses dados em mãos é possível prever que, por exemplo, se uma fibra, projetada com DGD cuja média seja conhecida, tem uma probabilidade de 10^{-5} de ultrapassar o limiar máximo de penalidade de PMD permitida, há uma expectativa que esta fibra em particular não esteja disponível cerca de 5 minutos por ano [KAMINOW, 2008].

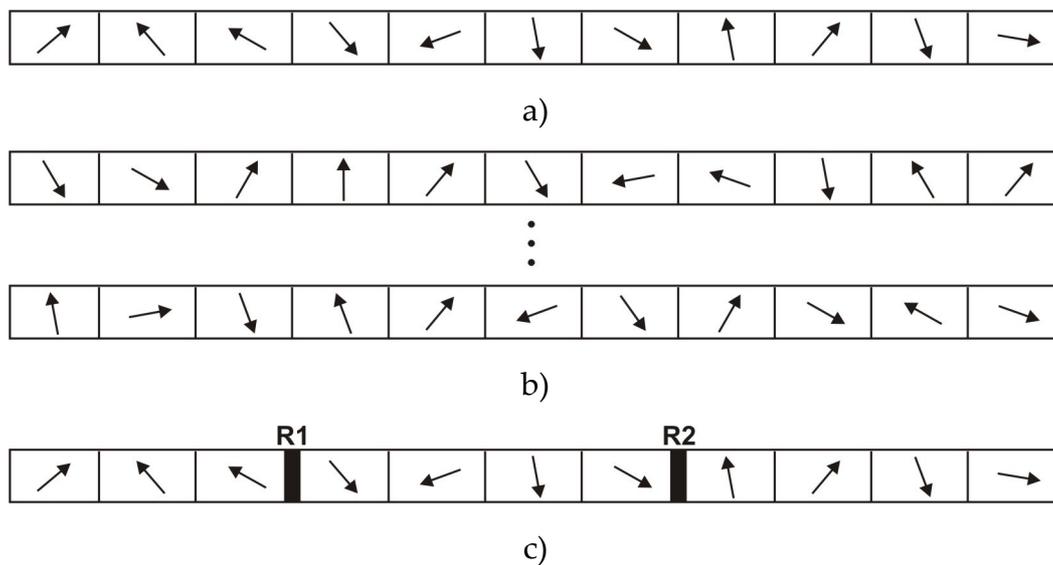


Figura 3.2: Modelos de fibra. a) Modelo de Placa de Retardo. b) A orientação dos vetores de birrefringentes variam a cada amostra. c) Modelo de articulação.

Porém, de um modo geral, os resultados de uma vasta gama de experimentos não suportam a “hipótese de mistura rápida”, pois a PMD parece mudar de forma mais lenta e mais restrita. Esses resultados levaram ao desenvolvimento do chamado “modelo de articulações”, representado na Figura 3.2 (c). O modelo de articulação propõe que as variações na PMD vêm de duas fontes: da PMD das “placas de retardo”, em seções enterradas de fibra, como na Figura 3.2 (a); e das várias “articulações”, que são seções curtas e expostas, como R1 e R2 na Figura 3.2 (c), as quais são vulneráveis a perturbações

externas. Estas articulações são também seções de fibra de "placas de retardo" como as anteriores, diferindo apenas que elas estão mais expostas ao ambiente do que as seções de fibra enterradas.

Considere um condutor de fibra de um enlace através de uma estrada. Quando durante o percurso a fibra se depara com pontes, por exemplo, a sua canalização emerge do subsolo e entra novamente no subsolo no outro lado. Os estresses ambientais pelos quais esta fibra passa na travessia da ponte e enquanto enterrada em alguns trechos são bastante diferentes. A fibra enterrada passa por algumas experiências de perturbações mecânicas e lentos processos de difusão térmica que amortecem as variações de temperatura e reduzem a sua rapidez. Em contrapartida, uma frente fria que se move rapidamente será sentida bruscamente por fibras dentro em condutores expostos num curto prazo. Um esquema representando os diferentes níveis de sensibilidade ambiental é mostrado na Figura 3.2 (c), e seus modelos de articulação R1 e R2, como placas rotacionadoras de polarização.

No início do desenvolvimento da teoria estatística da PMD, foi desenvolvida uma analogia mais rigorosa para o movimento Browniano, que é uma das descrições matemáticas da evolução do vetor PMD no decorrer da fibra, o qual possui propriedades ditas aleatórias. Independentemente, Foschini e Poole [FOSCHINI, , 1991] introduziram técnicas de Equações Diferenciais Estocásticas, foi uma década onde se formaram grupos de estudo por todo o mundo [KAMINOW, 2008].

Neste trabalho, o espalhamento do pulso é calculado através de uma função onde o atraso médio diferencial de grupo (DGD), dado em ps, entre os dois modos de polarização depende do comprimento do enlace (L), dado em Km e do componente D_{PMD} da fibra, dado em ps/\sqrt{km} . Esse componente D_{PMD} é o parâmetro de PMD da fibra óptica, fornecido pelo fabricante, o qual indica o quanto uma fibra é sensível ao efeito de PMD. Em fibras de fabricação antiga e mais sensíveis a essa degradação, o componente D_{PMD} é maior, em torno de 1,8 até 2 ps/\sqrt{km} . Já em fibras de fabricação mais recente e portanto bem mais

tolerantes aos efeitos degradantes da PMD, o valor do D_{PMD} fica em torno de $0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$. Porém, atualmente já se pode encontrar fibras fabricadas com componente D_{PMD} de até $0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$. Com essas últimas é possível obter uma transmissão de alcance muito maior, além de conexões com maior qualidade de transmissão. O DGD ou Δt pode ser calculado por [LIU, 2004], [RAMASHWAMI, 1995]:

$$\Delta t = D_{PMD} \sqrt{L} \quad (3.1)$$

A norma ITU G.691 - *Optical interfaces for single channel STM-64, STM-256 and other SDH systems with optical amplifiers* - define que 1 dB deve ser a penalidade máxima da degradação do sinal óptico para que uma determinada rota tenha uma transmissão considerada de qualidade. A penalidade, em dB, ocasionada pela PMD em uma fibra depende do seu DGD e da taxa de transmissão dos enlaces, dada em bps, podendo ser estimada por [LIU, 2004], [RAMASHWAMI, 1995]:

$$\text{Penalidade}(dB) \approx 26 \cdot \left[\frac{(\Delta t)^2}{T^2} \right] \cdot \gamma (1 - \gamma) \quad (3.2)$$

Em que T é o período ou tempo de *bit*, dado por $T = \frac{1}{B}$, B é a taxa de transmissão e γ é a fração da potência lançada em cada modo de polarização.

Nos experimentos deste trabalho, essa função é utilizada para calcular a penalidade em cada enlace das rotas encontradas e a soma das penalidades desses enlaces é o valor utilizado como penalidade de cada conexão ou rota.

3.2 Modelo de inclusão do efeito de PMD

A inclusão do efeito de PMD em uma rota de uma rede óptica transparente é dada

depois de calcular a penalidade PMD em cada enlace, de acordo com a equação 3.2, através do modelo matemático demonstrado na equação 3.3.

$$Penalidade_{ij}(dB) = \sum_{k=1}^H P^k(dB) \quad (3.3)$$

Em que i representa o nó de origem da conexão, j o nó de destino, H a quantidade de saltos entre origem e destino e k enlace tratado. A penalidade total da rota é o somatório da penalidade de todos os enlaces envolvidos na conexão. Neste caso, a penalidade de PMD é uma degradação inerente apenas à escolha de rota, pois a alocação de comprimento de onda (WA – *Wavelength Assignment*) é indiferente para este efeito, dito PMD de primeira ordem.

Observe a Figura 3.3. Caso tenha uma requisição de conexão do nó A para o nó L , um caminho óptico possível é o demonstrado na figura com comprimento de onda λ_1 . Nesse caso, $i=A$ e $j=L$. A rota encontrada possui 3 saltos, que são os enlaces (k) AD , DG e GL , portanto $H=3$. Então, a penalidade total da rota pode ser dada como $Penalidade_{AL}(dB) = P_{AD} + P_{DG} + P_{GL}$. Esse valor é o que será usado como penalidade de PMD de cada rota pelo algoritmo de roteamento proposto.

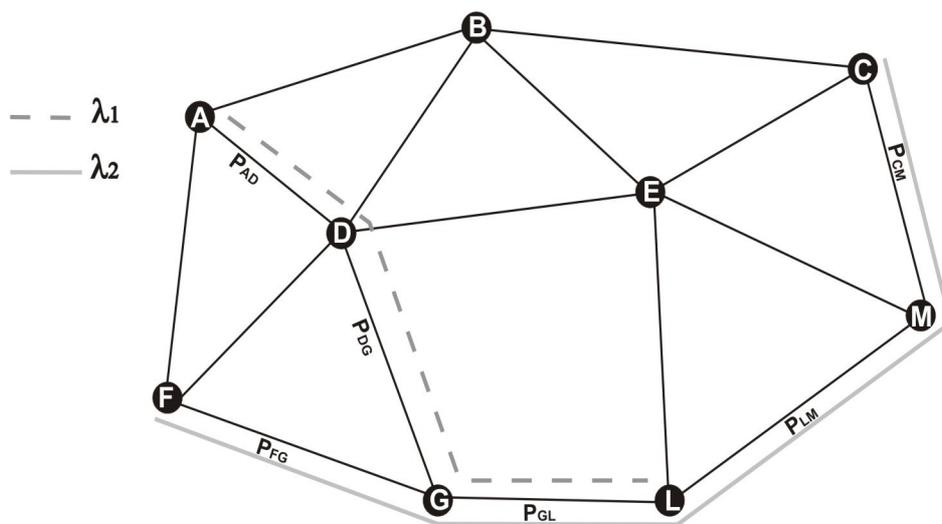


Figura 3.3: Demonstração do cálculo da penalidade de PMD de uma rota.

3.3 Deficiências de transmissão causados pela PMD

Tendo em vista que durante a transmissão de sinais pela fibra óptica o pulso tem dois modos de polarização que trafegam com velocidades ligeiramente diferentes, ditos modo rápido e modo lento, e que ao chegar no receptor esses dois modos são separados no tempo pelo DGD, ou espalhamento de pulso, nesta seção serão discutidas as deficiências de transmissão causados por este mecanismo.

3.3.1 Aproximação de Poole

Considere um pulso com polarização qualquer na entrada de uma fibra, transmitido em uma superposição de dois pulsos de modos de polarização ortogonais na fibra. Como os dois pulsos têm polarizações ortogonais, podem ser vistos como independentes. A sua energia, acrescenta-se a energia total do pulso original e a fração da energia no modo lento principal é representado pela taxa de fração de potência γ . O restante da potência óptica, $1 - \gamma$, está no estado no modo rápido. O campo elétrico resultante na saída da fibra é então [KAMINOW, 2008]:

$$E(t) = \sqrt{\gamma} E\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) s_{slow} + \sqrt{1-\gamma} E\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) s_{fast} \quad (3.4)$$

Em que s_{slow} e s_{fast} são os vetores ortogonais dos modos lento e rápido, Δt é o DGD, e $E(t)$ é o campo elétrico. Como os detectores de sinal convencionais são insensíveis à polarização, os dois termos do lado direito da Equação 3.4 adicionam-se quando convertidos de sinal óptico para elétrico, produzindo uma distorção do pulso elétrico. Essas distorções aumentam a taxa de erro de *bit* (BER) nos sistemas de transmissão. Devido a isso, o comportamento da BER é similar aos níveis de espalhamento do pulso (DGD) no decorrer do enlace.

Para experimentos feitos no planejamento de rede, uma métrica diferente da BER

provou ser mais útil, a relação sinal-ruído óptica (OSNR). Considerando a penalidade OSNR no mesmo nível da BER dada, tem-se a indicação de quanto ela precisa ser incrementada para que o nível da BER seja inalterado após a introdução de algum comprometimento de um determinado sistema. A primeira estimativa analítica da penalidade PMD foi proposto por Poole et al. [POOLE, 1991a]:

$$\varepsilon (dB) = A \left(\frac{\tau}{T} \right)^2 \gamma (1 - \gamma) \quad (3.5)$$

Em que T é o período de *bit* (ou o inverso da taxa de transmissão), e A é um parâmetro do receptor, que varia de 20 a 40 para receptores comerciais, sendo menor para os formatos RZ, e γ é a fração do modo de polarização. A derivação da Equação 3.5 pressupõe que uma penalidade pequena causada é igual à amplificação do pulso, que é calculado com base no momento da recepção do pulso elétrico.

3.3.2 Penalidade PMD de primeira ordem em receptores reais

A versatilidade da aproximação Poole, vista na Equação 3.5, tem uma certa ambigüidade em A , que é o parâmetro do receptor, de acordo com a primeira estimativa de penalidade de PMD [POOLE, 1991a]. Geralmente, A é determinada pela forma do pulso elétrico e, portanto, depende de muitos fatores. Estudos numéricos realizados por Winzer et al. [WINZER, 2003] demonstraram uma interação complexa entre dois mecanismos de diagrama de olho: o aumento do trem de pulsos inferior e o outro é a redução do trem de pulsos superior de um olho óptico. Em termos práticos, o efeito aparece como uma forte e não-monotônica dependência de A na largura de banda do filtro elétrico para ambos os formatos de modulação, NRZ e RZ. Curiosamente, enquanto os valores experimentais de A acompanham as tendências previstas por meio de simulações, em média, a incerteza experimental é grande. Isto sugere uma influência de outros parâmetros do receptor, além da largura de banda elétrica.

Em resumo, todas as dependências da penalidade em uma fibra são um pouco semelhantes de alguma forma. No entanto, as diferenças indicam que existem numerosos parâmetros sutis, que variam entre os receptores, que determinam a exata dependência do funcionamento das penalidades. Assim, a previsão quantitativa confiável desses efeitos pode ser impraticável de conseguir.

3.3.3 Probabilidade de interrupções de PMD induzida

O cálculo confiável da interrupção de PMD-induzida é talvez o mais difícil e ainda o tema mais importante na área. A dificuldade surge da necessidade de fazer suposições sobre as estatísticas confiáveis mediante as mudanças, de como a PMD é lançada nos modos de polarização.

A PMD difere de outros efeitos da camada física por causa de sua natureza dinâmica: o valor instantâneo visto por um canal muda no decorrer do tempo aleatoriamente, atingindo valores altos. Estes valores altos, por sua vez, poderiam causar penalidades, como a redução de margem da OSNR no sistema. Quando a penalidade de um sistema é maior do que um limite máximo estabelecido, o sistema experimenta uma interrupção. Como PMD e o lançamento de cada modo de polarização evoluem no decorrer do tempo, um determinado sistema passa por interrupções intermitentes, descritas estatisticamente como a probabilidade de interrupção. Se um sistema opera em um tempo infinito (ou seja, um intervalo muito maior do que a escala de tempo de variação de PMD), a probabilidade de falha seria uma razão entre o tempo de interrupção e o tempo total.

A probabilidade de falha é por vezes descrita através de seu complemento como $P_{\text{out}} = 1 - a$, onde a é a disponibilidade do sistema, a fração de tempo que um sistema está em uma condição de funcionamento, ou seja, $a = (\text{tempo de funcionamento sem falhas}) / (\text{tempo total})$. Assim, uma disponibilidade de "cinco noves", $a = 0,99999$, corresponde a uma probabilidade de falha $P_{\text{out}} = 10^{-5}$. Note que a disponibilidade de um sistema complexo de

a_{Σ} cai com o crescente número de componentes.

Na verdade, a disponibilidade do sistema é demonstrada na Equação 3.6, já que as baixas probabilidades de falha simplesmente adicionam para a primeira ordem [FONSECA, 2005].

$$a_{\Sigma} \approx 1 - \sum_i^N (1 - a_i) \quad (3.6)$$

em que, i é cada componente do sistema e N o número total de componentes. Assim, se um sistema é composto por dez componentes, dos “cinco noves” ($P_{\text{out}} = 10^{-5}$) disponíveis, a disponibilidade do sistema será apenas de “quatro noves” ($P_{\text{out}} = 10^{-4}$).

Conseguir alta disponibilidade de um sistema que compreende milhares de componentes eletrônicos é uma tarefa extremamente complexa, exigindo dos operadores de rede a implementação de esquemas de proteção e restauração. Para sistemas sem proteção, a disponibilidade é limitada pela camada física, que é justamente o que está em estudo neste trabalho. No entanto, as falhas eletrônicas limitam a disponibilidade do sistema para o intervalo de três a “quatro noves”, entretanto, a comunidade considera a disponibilidade cinco noves como referência para a PMD [FONSECA, 2005].

3.4 Técnicas de compensação de PMD

O objetivo de compensar PMD no domínio óptico é reduzir o prejuízo total causado pela PMD da fibra de transmissão. Em geral, a compensação óptica consiste de um bloco contador, um sinal de retorno e um algoritmo de controle, como mostrado na Figura 3.4.

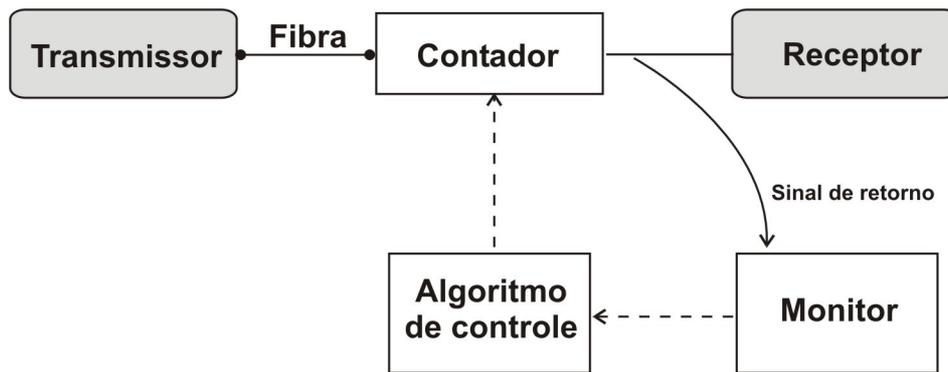


Figura 3.4: Esquema geral de compensação de PMD óptico.

3.4.1 Transmissão de Modo Principal de Polarização

A transmissão dos PSPs (*Principal State of Polarization* – Modo Principal de Polarização) usando controle de polarização na entrada da fibra foi a primeira técnica de compensação óptica de PMD a ser demonstrada. Um esquema é mostrado na Figura 3.5, onde temos também um controlador de polarização (PC – *Polarization Controller*) além dos outros componentes mostrados no esquema geral. A equação simples que descreve esta técnica é [KAMINOW, 2002]:

$$\hat{s} = \hat{p}_s \quad (3.7)$$

em que, \hat{s} é a polarização do sinal lançado e \hat{p}_s é o PSP na entrada da fibra. Quando os PSPs variam com frequência, essa técnica compensa apenas a PMD de primeira ordem. Isso também requer um equipamento especial, tanto no transmissor quanto no receptor, e a compensação é limitada pelo tempo de propagação de ida e volta através da fibra. No entanto, esta técnica tem sido utilizada com sucesso em um teste de campo, onde um sinal transmitido a uma taxa de 10 Gbps, num enlace de mais de 450 km de fibra com a média de 60 ps de DGD [ONO, 2000].

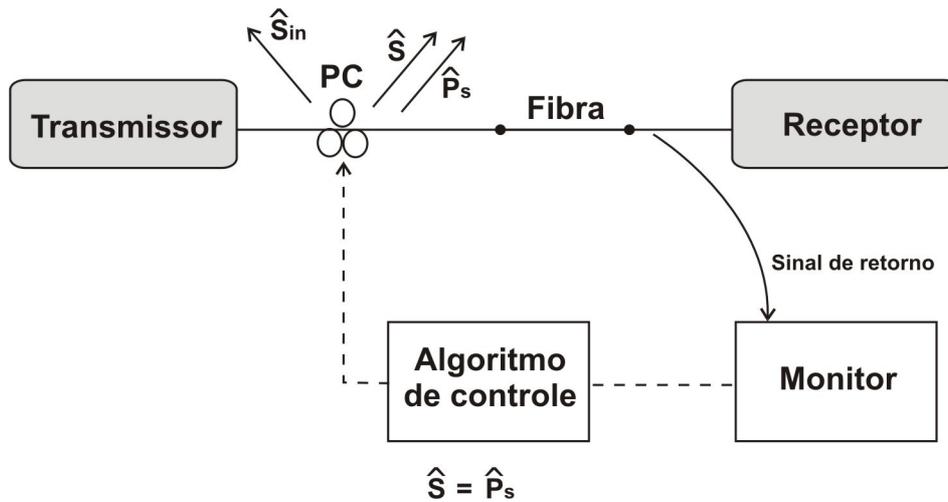


Figura 3.5: Compensação de PMD, transmitindo de um PSP. O controlador de polarização (PC) na entrada da fibra ajusta o sinal para coincidir à entrada do modo de polarização.

3.4.2 Anulação de PMD

O segundo principal método de compensação óptica é a anulação do vetor PMD do sistema combinado na saída da fibra, utilizando um elemento de compensação de PMD como mostrado na Figura 3.6. A relação que descreve este tipo de compensação em uma dada frequência de portadora é mostrada na Equação 3.8 [KAMINOW, 2002].

$$\vec{\tau}_{out} = -\vec{\tau}_{comp} \quad (3.8)$$

Observe que, de acordo com a regra de concatenação, tomamos a soma vetorial da PMD da fibra e o compensador de PMD de um ponto de referência comum, por exemplo, a entrada (com compensador) e saída fibra. Este sistema exige um elemento para ajuste da birrefringência para coincidir com a magnitude da PMD da fibra e um controlador de polarização para ajustar a direção do vetor do compensador de PMD. Porém, um elemento para ajustar a birrefringência pode ser difícil de implementar na prática. Além disso, um discreto atraso variável de primeira ordem se forma a partir de rotas mais longas, formadas por enlaces consecutivos.

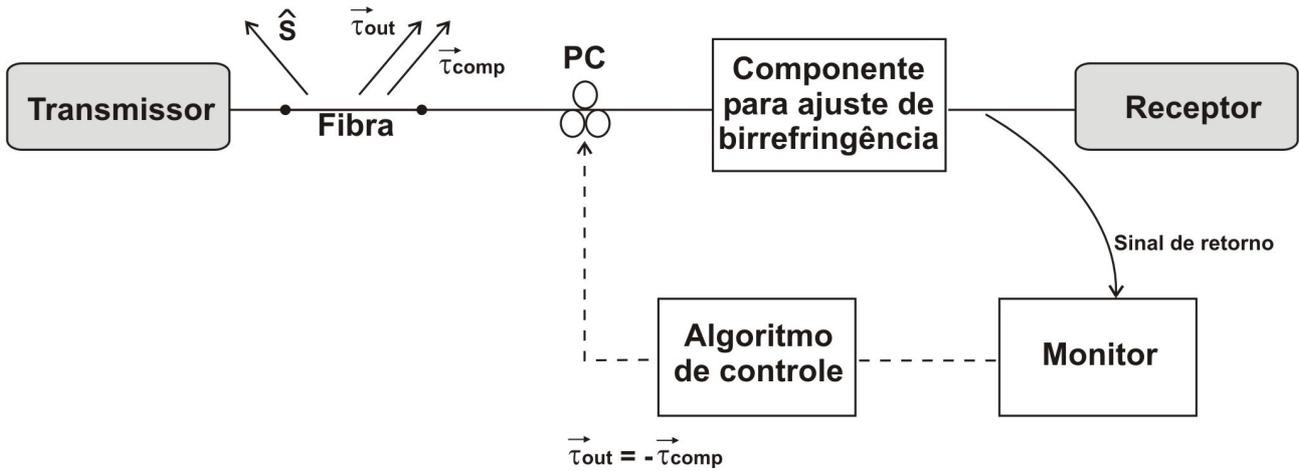


Figura 3.6: Anulação de PMD.

3.4.3 DGD Fixo

A terceira forma de fazer a compensação óptica e que tem sido amplamente investigada é mostrado na Figura 3.7. Este compensador simples e dinâmico consiste em um controlador de polarização ajustável e um único elemento com DGD fixo, normalmente uma fibra de comprimento fixo. Há duas maneiras de operação possíveis para este compensador. A primeira é ajustar o controlador de polarização para que a combinação da fibra mais o compensador tenham um PSP que está alinhado com a polarização de entrada, conforme descrito na Equação 3.9 [KAMINOW, 2002]:

$$\hat{s} = a(\vec{\tau}_{in} + R^{-1}\vec{\tau}_{comp}) \quad (3.9)$$

em que, a é uma constante escalar e onde a regra de concatenação foi chamada para a soma $\vec{\tau}_{in}$ e $\vec{\tau}_{comp}$ na entrada da fibra. Como mostrado na Figura. 3.7, por esta forma de operação, o DGD fixo do compensador deve ser suficientemente grande de modo que $|\tau_{comp}| > |\vec{\tau}_{in} \cdot \text{sen } \phi|$, em que ϕ é o ângulo entre o modos de polarização \hat{s} e o vetor $\vec{\tau}_{in}$ de entrada. Note também que o controlador de polarização pode ser ajustado para duas orientações possíveis, $R^{-1}\vec{\tau}_{comp}$ para satisfazer a Equação 3.8. O segundo modo de operação, aplicável quando $|\tau_{comp}| < |\vec{\tau}_{in} \cdot \text{sen } \phi|$, é para ajustar o controlador de polarização para minimizar a penalidade resultante do vetor PMD associado à fibra e o compensador

[KAMINOW, 2002]:

$$\min |(\vec{\tau}_{in} + R^{-1}\vec{\tau}_{comp}) \cdot \hat{s} \cos \theta| \quad (3.10)$$

em que θ é o ângulo entre o modo de polarização lançado \hat{s} e o vetor $\vec{\tau}_{in} + R^{-1}\vec{\tau}_{comp}$. O compensador da Figura 3.6 muitas vezes é implementado usando um monitoramento do grau de polarização (DOP – *Degree-of-polarization*). Ao maximizar o DOP do sinal compensado, é irrelevante qual o modo de operação está em uso em qualquer ponto específico no tempo. Este compensador com monitoramento DOP foi utilizado em diversos testes de campo a 10 Gbps com fibras de DGDs com mais de 30 ps [CHBAT, 1999], [LANNE, 2000], [NAGEL, 2000]. A compensação adaptativa de PMD em 40 Gbps também foi demonstrada em [LANNE, 2001].

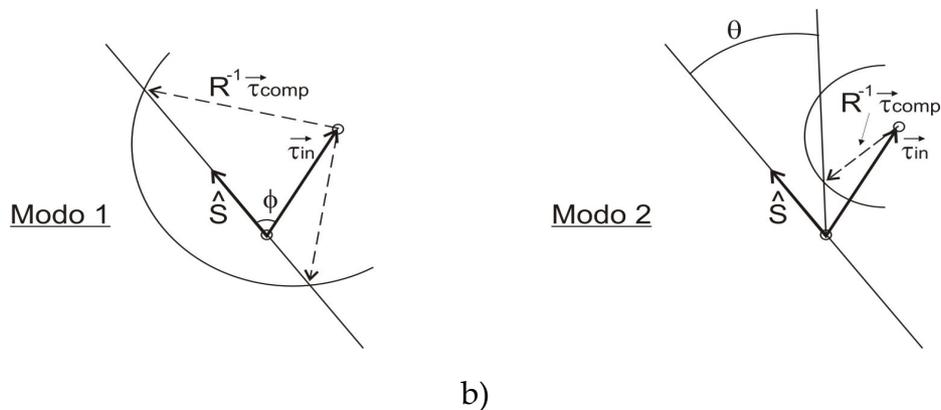
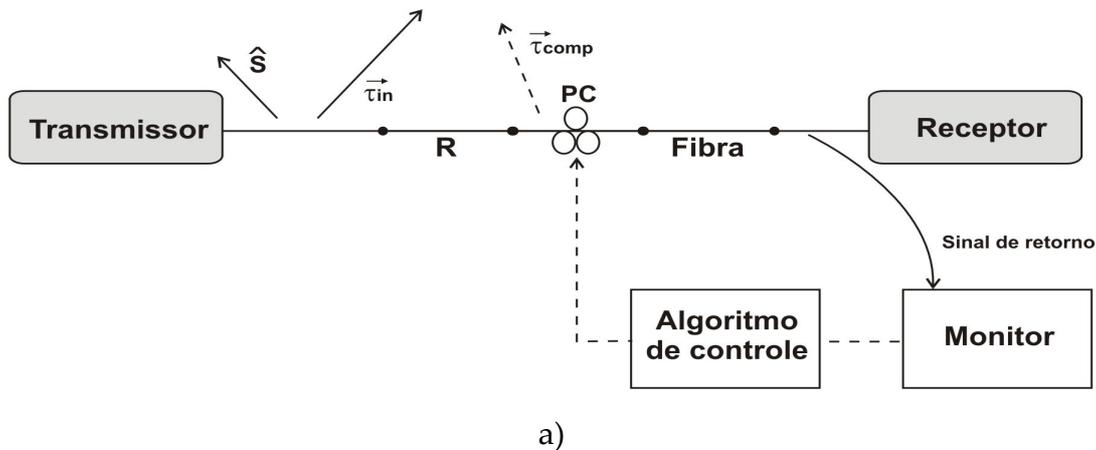


Figura 3.7: a) Atenuação de PMD utilizando um compensador DGD fixo. (b) Os dois modos de operação são indicados por diagramas vetor PMD.

Na realidade, o compensador de Anulação de PMD (e o compensador de DGD fixo) pode não funcionar exatamente de acordo com os princípios de compensação de PMD de primeira ordem, e seu funcionamento detalhado depende do bloco monitor e do algoritmo de controle. Alguns estudos mostraram que estes compensadores ópticos podem mostrar melhor desempenho da BER quando o transformador não cancela completamente o vetor de PMD de primeira ordem. Na verdade, o compensador de Anulação de PMD (bem como o compensador DGD fixo) pode ser capaz de compensar a PMD de ordens superiores [NAGEL, 2000], [LANNE, 2001], [KARLSSON, 2001].

3.4.4 Compensação de Pulso

Um regime de compensação de PMD que não se encaixa nas três classificações anteriores é a compressão de pulso na recepção. Um compensador que consiste em um modulador de fase síncrona seguido por um elemento dispersivo tem compensado 60 ps de DGD a 10 Gbps. Esta técnica não requer nenhum retorno (*feedback*) e é independente do lançamento do modo de polarização \hat{s} , no entanto só pode ser usado com modulação RZ. Uma desvantagem é que, embora a taxa de penalidade de PMD diminua, a probabilidade de obter penalidades muito elevadas permanece constante. Espera-se também que uma potencial mudança na transmissão do sinal possa afetar negativamente esse tipo de compensação de PMD [KAMINOW, 2002].

3.4.5 Compensação de alta ordem

Embora até agora a maioria dos trabalhos publicados sobre compensação óptica tenham tratado apenas a PMD de primeira ordem, várias técnicas para banda larga ou de compensação PMD de ordem superior têm sido propostas e demonstradas em laboratório. Uma série de variações sobre dois compensadores de fase foram propostas. Patscher e Eckhardt [PATSCHER, 1997] propôs pela primeira vez um método para compensar o DGD e proporcionar uma variação linear do modo principal de polarização para atenuar a

componente despolarização de segunda ordem da PMD [KAMINOW, 2002].

3.4.6 Compensadores Multi-seção

Compensadores constituídos por várias seções birrefringentes (às vezes conhecidos como equalizadores de distribuição de PMD) que potencialmente podem compensar largura de banda e PMD de alta-ordem também foram propostos e demonstrados em laboratório. O princípio de funcionamento é que um grande número de seções curtas de DGD separadas por transformadores de polarização podem ser ajustadas para que o perfil do vetor PMD do compensador siga o perfil da fibra de transmissão, em ordem inversa. Três seções de fibra com os controladores de polarização foram utilizados para compensar os 30 ps de DGD de um emulador de PMD [SANDEL, 1998]. Compensação de 60ps de DGD para pulsos de 40 GHz foram demonstrados [SANDEL, 1999]. Um equalizador distribuído mais tarde foi integrado no X-CUT, Y-propagation Ti:LiNbOs [NOE, 1999a], podendo compensar até 43 ps de DGD. Com cinqüenta seções de niobato de lítio, este equalizador distribuído demonstrou uma compensação de 20 ps de DGD para 6 ps, em pulsos de 40 GHz [HINZ, 1999b].

Testes desses compensadores distribuídos estão incompletos, uma vez que por enquanto todas as manifestações têm utilizado emuladores de PMD com três ou menos seções de fibra. Um problema potencial com estes equalizadores distribuídos é que eles exigem um grande número de parâmetros de controle. Além disso, outra questão crítica é que a compensação para as várias ordens é acoplada e tem que ser feita simultaneamente. Mais detalhes sobre a teoria e a operação desses compensadores são fornecidos em [NOE, 1999b].

3.4.7 Compensadores Multi-canais

A possibilidade de compensação de PMD simultânea de múltiplos canais também foi explorada. Khosravani et al. [KHOSRAVANI, 2000] demonstraram a redução de PMD

simultaneamente em quatro canais WDM, ajustando o único módulo de compensação para otimizar o desempenho geral do sistema. O experimento usou as informações de retorno sobre a degradação total de canais WDM combinados e do compensador de PMD foi ajustado para minimizar a DGD para o pior dos quatro canais WDM, já que este canal dominou a degradação geral do sistema. A atenuação de PMD usando equalizações de vários circuitos ópticos também foi proposto [OZEKI, 1994] e estendido para a compensação de largura de banda larga [MOLLER, 2000a], [MOLLER, 2000b] e equalização multi-canal de PMD [YAMADA, 2001].

3.5 Técnicas elétricas de Compensação de PMD

Embora a compensação de PMD no domínio óptico possa, em princípio, restaurar perfeitamente a forma do pulso óptico, já que a informação de fase não é perdida, a compensação de PMD no domínio elétrico tem uma série de vantagens, incluindo um potencial baixo custo, atenuação simultânea de interferência entre símbolos (ISI) e de uma variedade de perturbações da transmissão. A possibilidade de integrar um atenuador de PMD na parte eletrônica do receptor é também uma vantagem, especialmente se cada canal for compensado individualmente. Existem três categorias principais de compensadores elétricos: filtros lineares, filtros não-lineares e técnicas de processamento de sinal mais complexas [KAMINOW, 2002].

A PMD provoca uma distorção linear na recepção do sinal recebido, dado que os sinais ortogonais dos dois modos de polarização adicionam potência no receptor, isto é, adicionam amplitude no domínio elétrico. Portanto, um filtro linear pode ser usado para equalizar a PMD enquanto o canal de recepção do sinal não está fechado. O Filtro Transversal (TF – *Transversal Filter*) é o filtro linear mais comum e também é dito como um equalizador *feed-forward*. Outros trabalhos deram origem a propostas de compensação de PMD e compensação de dispersão cromática a 10 Gbps usando um TF coaxial [SCHLUMP, 1998], por exemplo, bem como a adaptação da atenuação de PMD usando ajuste de tensão

[BULOW, 1999].

Técnicas elétricas de compensação de PMD têm sido citadas na literatura como bastante promissoras, inclusive para sistemas ópticos operando a altíssimas taxas de transmissão, como por exemplo 100 Gbps [BUCHALI, 2004], [PAJNTAR, 2004].

3.6 Sumário

Neste capítulo foram vistos quais são os fatores que causam a penalidade de PMD na fibra óptica e suas conseqüências. Foi também apresentado o modelo de inclusão de PMD no algoritmo RWA consciente do efeito. Foi feito o levantamento de algumas formas de representação matemática, estatística e descrição física dessa penalidade. Além disso, foram discutidas técnicas de compensação ópticas e elétricas para PMD. No Capítulo 4, serão revisadas estratégias de roteamento e alocação de comprimento de onda, apresentado o cenário das simulações realizadas neste trabalho, seus parâmetros e seus resultados.

Capítulo 4

Estratégias de Roteamento

Para que uma informação seja emitida do transmissor para o receptor em uma rede qualquer, é necessário que ela siga através de um caminho ou rota. Para determinar qual estratégia de roteamento é adequada a essa rede, é importante observar que tipo de aplicações vão utilizar, suas necessidades de transmissão e o impacto que elas podem causar ao desempenho da própria rede. Diante disso, pode-se escolher que estratégia melhor se adequa em cada caso.

4.1 Algoritmo RWA e Contrato de Serviço Óptico (OSLA)

Para o estabelecimento dinâmico de conexões em redes ópticas, a solução é o uso de um mecanismo de Controle de Admissão de Chamadas integrado ao Algoritmo de Alocação de Rota e de Comprimento de Onda (CAC/RWA) capaz de gerenciar a degradação sofrida por um pedido de conexão, que chega à rede óptica oriunda de uma rede cliente, de forma que os níveis de QoS exigidos pelas aplicações das redes clientes sejam atendidos, de acordo com o acordado no Contrato de Serviço Óptico (OSLA) [FONSECA, 2005].

Para que o algoritmo CAC/RWA possa conferir o atendimento ou não dos

parâmetros presentes no OSLA, é necessário que ele possua ligação direta com o plano de controle da rede óptica e das redes clientes. Tal ligação é necessária, pois para verificar se a nova conexão irá afetar o desempenho de outras conexões já ativas na rede e também se atende aos requisitos de QoS exigidos pelo cliente, o CAC/RWA precisa conhecer, por exemplo, os estados dos enlaces por onde vai passar a nova conexão.

O algoritmo RWA em uma rede óptica opaca, ou seja, uma rede com conversão eletro-óptica, tem por objetivo geral encontrar rotas e comprimentos de onda que maximizem a utilização dos recursos da rede (largura de banda, por exemplo) [ZANG, 2001], já que assume-se que todas as conexões ópticas possuem qualidade do sinal em toda a rota. Entretanto como já foi mencionado, a introdução de transparência, ou seja, a utilização de equipamentos totalmente ópticos fim-a-fim, impõe novos desafios no provisionamento de conexões ópticas. A consequência disso é o acúmulo de degradações impostas pela propagação dos sinais pela fibra. Como forma de resolver este problema, alguns trabalhos têm proposto soluções a partir de CAC/RWA's que levem em conta tais efeitos [FONSECA, 2005], [MARTINEZ, 2006a], [MARTINEZ, 2006b], [PINART, 2006], [STRAND, 2005], [HUANG, 2005], [RAMAMURTHY, 2009], [CARDILLO, 2005], [KULKARNI, 2005], [FONSECA, 2004a], [FONSECA, 2004b], [KILPER, 2004], [ALI, 2002], [LIMA, 2004], [FILHO, 2003], [DENG, 2004], [FILHO, 2007]. Basicamente pode-se dividir estes trabalhos em dois grupos: os que usam monitoramento dos efeitos em tempo real e os que usam modelos analíticos. A Tabela 1, mostra a relação entre alguns trabalhos e os efeitos que cada um deles trata.

Em todos os casos mostrados na Tabela 1, é considerado que o controle da rede é centralizado e responsável pela execução do algoritmo CAC/RWA, que oferece como solução uma rota e comprimento de onda, ou caminho óptico, que satisfaz a um determinado conjunto de parâmetros de performance (como por exemplo OSNR, PMD, etc). Tais parâmetros estão descritos no OSLA previamente estabelecido entre os operadores da rede óptica e suas redes clientes.

Tabela 1: Algoritmos CAC/RWA's e as limitações da camada física (*physical impairments*) consideradas.

Legenda: Relação Sinal Ruído Óptica (OSNR - *Optical Signal Noise Ratio*), Ruído de Emissão Espontânea Amplificada (ASE - *Amplified Spontaneous Emission*), Mistura de Quatro Ondas (FWM - *Four-Wave Mixing*), Dispersão de Modo de Polarização (PMD - *Polarization Mode Dispersion*).

<i>Referência</i>	<i>Modelo</i>	<i>Limitação considerada</i>	<i>Algoritmo CAC/RWA</i>
[ALI, 2002], [LIMA, 2004]	PMD e ASE (separadamente)	Ruído ASE e PMD	Dois passos: 1 – Solução da camada de rede; 2 – Avaliação das rotas sob o ponto de vista das limitações consideradas.
[RAMAMURTHY, 1999], [FILHO, 2003]	Estimação de BER	Ruído ASE e <i>Crosstalk</i>	
[CARDILLO, 2005], [DENG, 2004]	OSNR	Ruído ASE e saturação dos amplificadores	
[FONSECA, 2005], [RAMAMURTHY, 1999], [CARDILLO, 2005]	Estimação de BER	FWM	Três passos: 1 – Cálculo do custo na rede; 2 – Menor caminho; 3 – Validação da qualidade do sinal.
[KULKARNI, 2005], [LIMA, 2004]	Fator Q	Dispersão Cromática, PMD, ruído ASE	

O CAC/RWA em geral trabalha da seguinte forma, inicialmente são computadas as rotas que obedecem aos atributos da camada de rede e objetivos de desempenho, uma vez que uma dada rota atenda a tal objetivo ela se torna uma rota candidata. Em seguida, dentre o conjunto de rotas candidatas, o algoritmo irá selecionar qual delas melhor atende aos requisitos de QoS estabelecidos no OSLA [FONSECA, 2005].

Para a busca das rotas que podem vir a se tornar candidatas à alocação, pode ser usado o roteamento fixo, o fixo-alternado ou o roteamento adaptativo. No roteamento fixo, as rotas entre a origem e o destino são calculadas de forma *off-line*, ou seja, sem que seja verificado o tráfego da rede no momento da requisição. Portanto, os pacotes que trafegam de uma mesma origem a um mesmo destino sempre usarão o mesmo caminho, que é especificado em uma tabela de rotas. O algoritmo de *Dijkstra* é um exemplo de algoritmo que utiliza o roteamento fixo de menor caminho, onde a rota entre dois pontos é definida como sendo o menor caminho entre eles, de acordo com a distância. É importante

lembrar que não necessariamente isso significa que esse caminho é o mais rápido ou o mais seguro, já existe a probabilidade que devido a algum problema na rede durante a transmissão, como congestionamento ou alguma falha de equipamentos, a informação não chegue ao seu destino.

O roteamento fixo-alternado funciona da mesma forma que o roteamento fixo. O que muda é que em vez de ser especificada apenas uma rota de maneira *off-line*, mais de uma rota é calculada para a mesma origem e destino. Essas rotas são guardadas também numa tabela de roteamento, que é consultada a cada requisição de conexão e o encaminhamento da informação é feito pelo caminho de menor custo dentre as rotas disponíveis. Em comparação ao roteamento fixo, esta estratégia dispõe da diminuição da probabilidade de bloqueio, já que a conexão terá uma segunda (ou terceira) rota pode ser utilizada quando a rota preferencial não puder ser usada, portanto essa estratégia tem também maior tolerância à falhas na rede.

Já no roteamento adaptativo, ou dinâmico, a rota é calculada *on-line*, ou seja, é levado em consideração o estado atual da rede, ou seja, são verificadas todas as conexões existentes no momento da requisição e fatores que possam influenciar no sucesso da transmissão do pacote, como congestionamento, entre outros. A partir daí é calculada uma rota para satisfazer a requisição que, da mesma forma que no roteamento fixo, são programadas para estabelecer a rota menor custo, como o menor caminho por exemplo. Além disso, também é possível pré-determinar um conjunto das k-ésimas rotas candidatas a serem empregadas para a conexão, calculando também rotas alternativas. Dentre as três modalidades de estratégia de roteamento descritas, esta é a que possui melhor probabilidade de bloqueio e tolerância à falhas.

Para a alocação de comprimento de onda, há diversas estratégias que podem ser utilizadas, dentre elas os algoritmos *Random* (aleatório), *First-Fit* (primeiro disponível), *Most Used* (mais usado), entre outros. No *Random*, quando a rede recebe uma requisição, são verificados quais são os comprimentos de onda que estão disponíveis para a conexão, dentre elas é escolhida aleatoriamente qual comprimento de onda é alocado. Já no

algoritmo *First-Fit*, os comprimentos de onda são numerados em uma lista, que é checada pela ordem quando uma requisição chega à rede, e o primeiro comprimento de onda que estiver disponível é alocado para a conexão. Em comparação ao *Random*, o *First-Fit* é menos complexo, pois não precisa checar todo o conjunto de comprimentos de onda da lista. No caso da heurística *Most-Used*, é selecionado para a alocação o comprimento de onda mais utilizado na rede, então por isso e por requerer informação global sobre a rede antes de atribuir o comprimento de onda, tem o custo computacional e complexidade maiores que os anteriores.

4.2 Métricas de desempenho para algoritmos de roteamento

Para que um algoritmo de roteamento que leve em conta as degradações do meio de transmissão óptico seja considerado eficiente, é imprescindível que ele tenha um bom desempenho quanto ao atendimento total de conexões, pois um bom funcionamento da rede, ou seja, uma boa quantidade de requisição atendidas é tão importante quanto a necessidade de obter rotas com qualidade de transmissão.

É possível medir esse desempenho através de métricas criadas para esse fim, as quais podem considerar diversos fatores, como por exemplo a Utilização do enlace e Vazão (*throughput*), que é a taxa de transferência efetiva de um sistema, ou seja, a taxa de entrada real quando se considera as perdas e atrasos no sistema, medida em bps; o Padrão dinâmico de tráfego, Extensibilidade (*scalability*), que é a capacidade de ampliação do sistema, Probabilidade de Bloqueio, Equidade, Probabilidade de Violação de Limiar (TVP), entre outros. Com base neles, pode-se verificar se o algoritmo trabalha de forma que mesmo atendendo aos requisitos de qualidade, consiga manter uma boa quantidade de conexões satisfeitas.

4.2.1 Probabilidade de Bloqueio

A probabilidade de bloqueio representa o número de caminhos ópticos rejeitados

perante o número total de requisições de conexão, que chegam na rede óptica através de pedidos das redes clientes, como está demonstrado na Equação 4.1. Esta é uma das métricas mais utilizadas para verificar o desempenho dos algoritmos de roteamento propostos.

$$\textit{Probabilidade de Bloqueio} = \frac{(N^\circ \textit{ Conexões Bloqueadas})}{(N^\circ \textit{ Total de Requisições})} \quad (4.1)$$

Essa taxa pode variar de acordo com vários aspectos particulares a cada tipo de rede, portanto é preciso analisar as características em cada caso e diante disso definir quais determinam o comportamento do bloqueio.

Como exemplo, a Figura 4.1 mostra o comportamento da probabilidade de bloqueio em uma rede óptica hipotética que possui critérios de QoT implementados, neste caso, o critério utilizado é o valor máximo de penalidade de PMD para as requisições de conexão sejam aceitas. São apresentados dois cenários para esta rede, um onde ela é formada por enlaces constituídos de fibras ópticas antigas, ou seja, bastante sensíveis aos efeitos que degradam o sinal transmitido, e outro onde a rede é composta por enlaces de fibras de fabricação mais recente e que por isso são mais resistentes às degradações impostas ao sinal. Nas duas situações, a taxa de transmissão experimentada é de 10 Gbps e pode-se observar o bloqueio com o tráfego variando de 20 até 100 Erlangs.

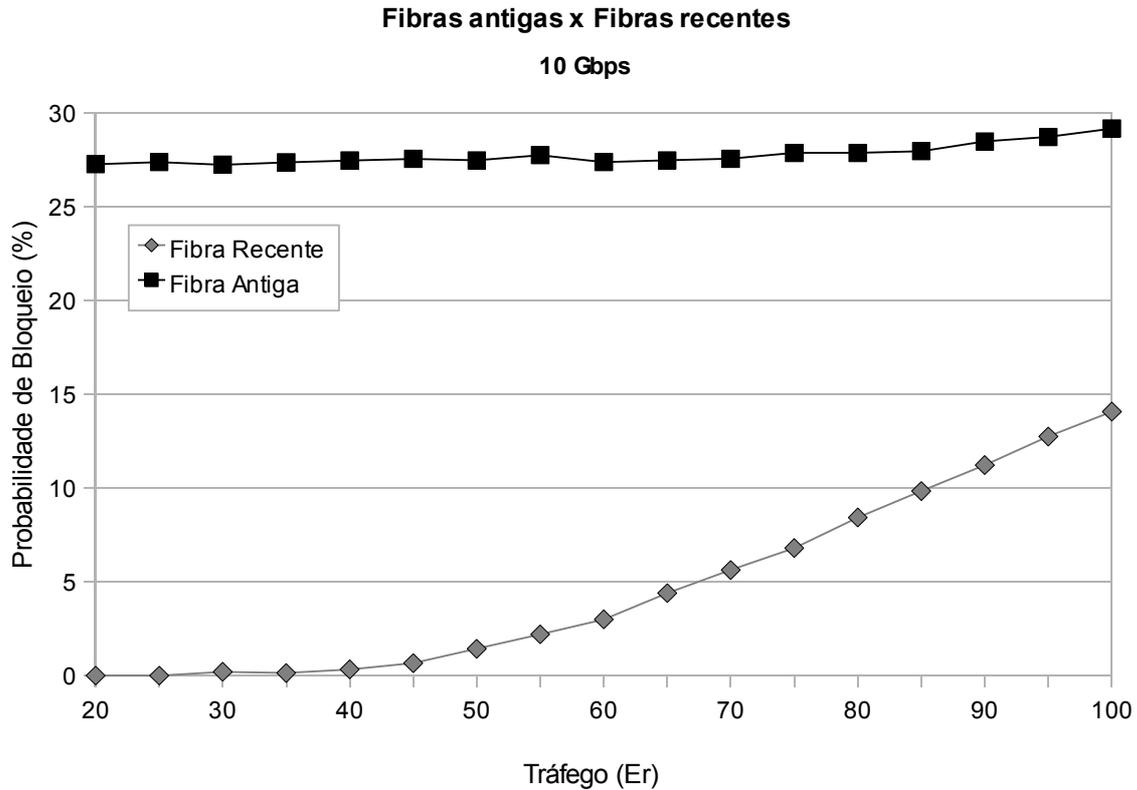


Figura 4.1: Probabilidade de Bloqueio mediante o tráfego.

Para esta situação, um dos fatores que influenciam no incremento da quantidade de conexões bloqueadas na rede é o aumento do tráfego, que significa que um maior número de conexões está sendo requisitado para a mesma taxa de transferência, o que faz com que haja um crescimento da possibilidade de congestionamento. Por esse motivo, quanto maior o tráfego, maior a probabilidade de bloqueio, seja qual for o tipo de fibra óptica instalado nos enlaces.

Como neste caso as redes incluem bloqueio por não atendimento aos critérios de qualidade de transmissão, o tipo da fibra também é um aspecto que afeta diretamente o comportamento do bloqueio das conexões. Perceba que, na Figura 4.2, em fibras mais sensíveis aos efeitos degradantes, neste caso a PMD, observa-se que a probabilidade de bloqueio é mais alta a qualquer tráfego, isto se comparada à rede que possui fibras menos sensíveis à degradações.

Também através da Figura 4.2 pode-se exemplificar outro fator que também afeta

os bloqueios nesta rede óptica, a taxa de transmissão. Verifique a mesma rede mostrada na figura anterior, sendo que atuando em três taxas de transmissão diferentes: 2,5 Gbps, 10 Gbps e 40 Gbps. Em todos os casos o tráfego é de 100 Erlangs. Observando por essa organização de dados, verificamos que para um mesmo tipo de fibra, quanto maior a taxa, maior é a sua probabilidade de ter requisições de conexão negadas, já que a penalidade de PMD tem crescimento exponencial diretamente proporcional à taxa de transmissão (ver capítulo 3). Além disso, é confirmada a influência do tipo de fibra no comportamento da probabilidade de bloqueio, pois para o mesmo tráfego, o bloqueio aumenta quanto mais sensível for a rede ao efeitos de degradação do sinal óptico.

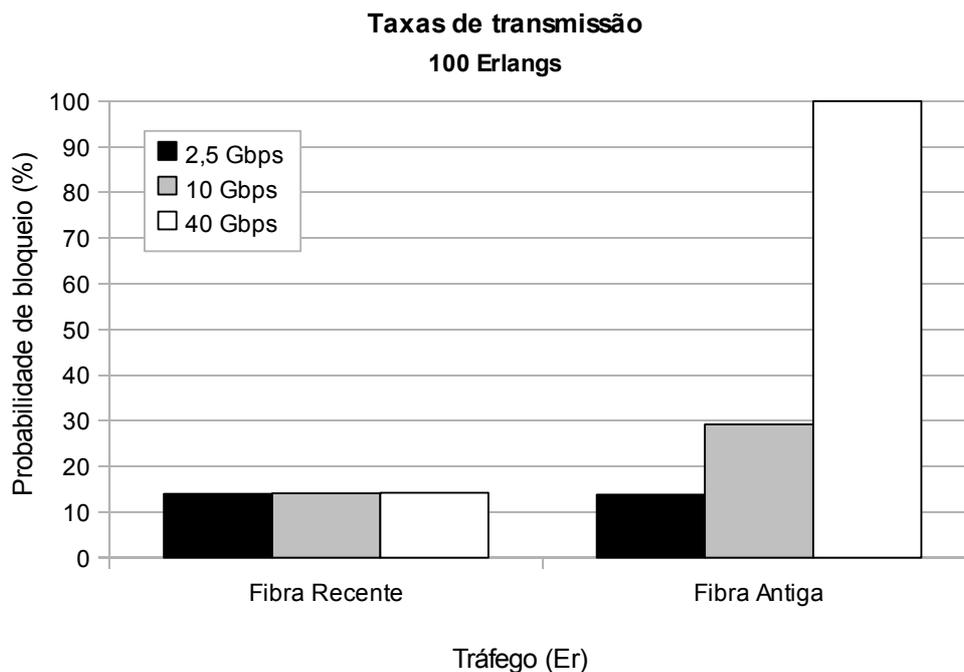


Figura 4.2: Probabilidade de bloqueio quanto à taxa de transferência.

4.2.2 Probabilidade de Violação do Limiar (TVP - *Threshold Violation Probability*)

Flutuações nos valores das penalidades dos efeitos que causam degradações na rede, como por exemplo a PMD, podem ser refletidas para as redes clientes prejudicando

e/ou violando o contrato de serviço acordado previamente entre a rede cliente e a rede óptica. Portanto, para que a solicitação de QoT da rede cliente seja corretamente tratada e mapeada em uma rota na rede óptica, a rede cliente pode exigir que seja estabelecido também um limiar máximo aceitável para os parâmetros de desempenho considerados no OSLA.

Suponha que há três conexões ativas na rede quando uma nova conexão é ativada. Quando essa nova conexão é estabelecida, as outras já existentes podem ter seus valores de penalidades aumentados acima do valor limiar máximo aceitável definido no contrato de serviço. Mesmo que essa extrapolação não atinja todas as conexões, o fato de uma delas ser violada é considerado no cálculo da Probabilidade de Violação de Limiar (TVP) da rede.

A TVP significa a probabilidade de pelo menos uma conexão ativa em toda a rede ter a sua penalidade (de PMD, por exemplo) acima do limite máximo determinado para que a conexão seja considerada de qualidade, após a mudança do estado de um caminho óptico na rede, isto é, após a ativação ou encerramento de uma conexão na rede [FONSECA, 2005]. Esta métrica pode ser expressa como:

Seja $p_x = \text{Prob}\{X=x\}$ a probabilidade de se ter $x = 0, 1, 2, \dots$ conexões ativas com seu valor de penalidade acima do máximo permitido depois que uma conexão é estabelecida ou encerrada na rede. A TVP representa a probabilidade de pelos menos uma conexão ativa ser degradada, isto é $TVP = [1 - p_x(x = 0)]$. Essa taxa pode ser útil para dar uma representatividade global de QoT na rede, pois provê uma medida de preservação e fornecimento de QoT estatístico. A QoT determinística é atingida à medida que $TVP \rightarrow 0$, em outras palavras, o processo de estabelecimento e encerramento de conexões nunca violaria o valor de penalidade máximo de outras conexões ativas na rede inteira, além de satisfazer a sua própria exigência de desempenho [FONSECA, 2005].

Para exemplificar, na Figura 4.3 temos a comparação entre a probabilidade de bloqueio e a probabilidade de violação de limiar de uma rede óptica com taxa de transmissão de 10 Gbps. Nesta rede, não há bloqueio das conexões por critérios de QoT,

porém é verificada a quantidade de conexões que extrapola o valor máximo da penalidade de PMD para que uma transmissão seja considerada de qualidade, que é de 1 dB de acordo com a especificação da ITU. Portanto, os bloqueios estabelecidos pelo algoritmo de roteamento neste exemplo são apenas quanto à não-continuidade de comprimento de onda nas rotas encontradas.

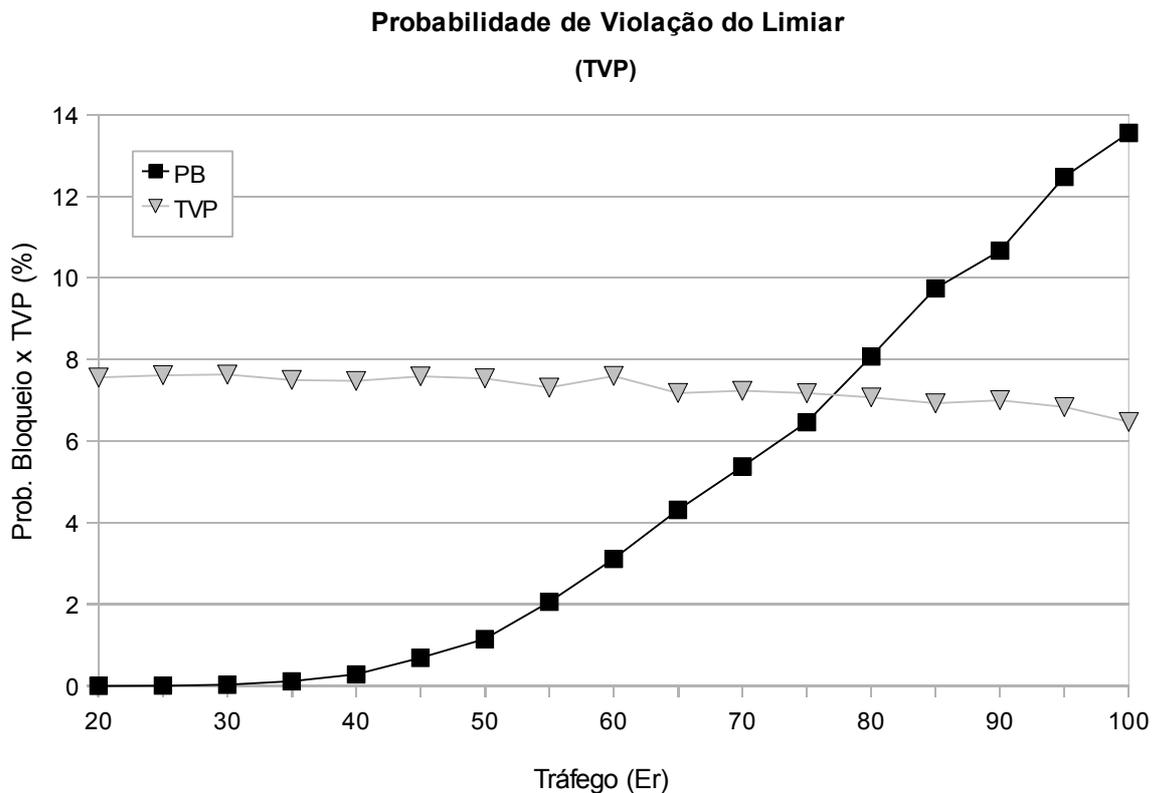


Figura 4.3: Probabilidade de bloqueio x TVP.

A partir dessa comparação, é possível verificar que quanto mais aumenta a probabilidade de bloqueio, ou seja, quanto mais são negados os pedidos de conexão com rotas longas e que por esse motivo tendem a possuir um valor de penalidade de PMD mais alto, menor a probabilidade de existirem conexões que ultrapassem ou violem o limite máximo de penalidade estabelecido no OSLA. Dessa forma, é possível concluir que essas duas métricas sempre serão inversamente proporcionais.

4.2.3 Eqüidade (*Fairness*)

A eqüidade (*fairness*) da rede também é uma métrica que pode se tornar muito importante na análise do comportamento das redes. A eqüidade da rede tem relação com a capacidade da rede fornecer probabilidade de bloqueio semelhante para caminhos ópticos com (de) dimensões (tamanhos) diferentes. Devido a motivos como a restrição de continuidade de comprimento de onda e o acúmulo de PMD, é esperado que conexões longas sofram bloqueio com maior freqüência do que conexões curtas, isto se nenhuma política para beneficiar conexões longas for empregada.

Para decidir-se se a rota é longa ou curta, utiliza-se o comprimento de interferência para uma rede de N nós com topologia em anel [BARRY, 1996], o qual é dado por:

$$L_{int} = \lceil N/4 \rceil \quad (4.2)$$

Se o tamanho da rota for maior do que L_{int} , a rota é dita longa, caso contrário a rota é dita curta.

O exemplo da Figura 4.4 apresenta uma rede óptica de 19 nós, operando a 10 Gbps, com tráfego de 100 Erlangs e bloqueio por QoT para penalidade de PMD > 1 dB. Nesse caso, $L_{int}=4,75$, ou seja, a rota dita longa possui 5 saltos. Nesta rede, isso indica que, à medida que o tamanho da rota se aproxima dessa quantidade de saltos, a probabilidade de bloqueio das conexões tende a aumentar. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de que o efeito cumulativo do PMD sobre uma rota é proporcional ao seu comprimento.

A eqüidade na rede, ou seja, sua capacidade da rede fornecer probabilidade de bloqueio semelhantes para rotas com comprimento similar se repete independente do tipo de fibra, taxa de transferência ou tráfego, como podemos confirmar observando a Figura 4.5.

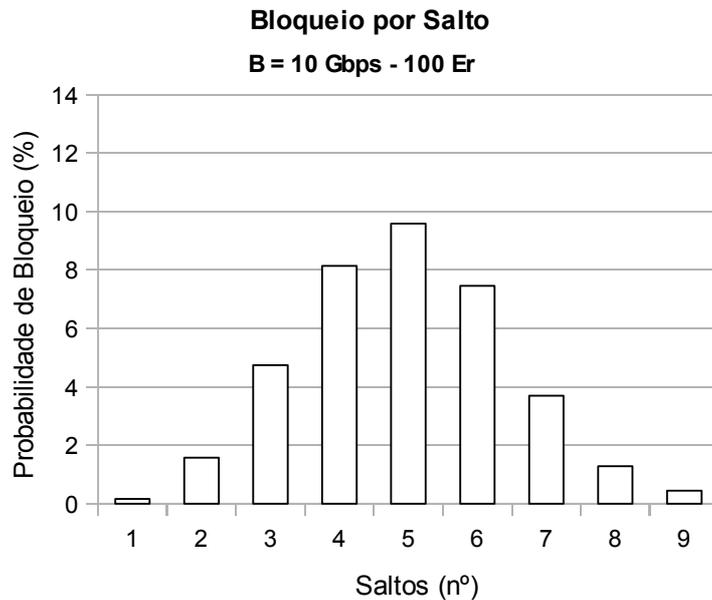


Figura 4.4: Equidade para taxa de 10 Gbps.

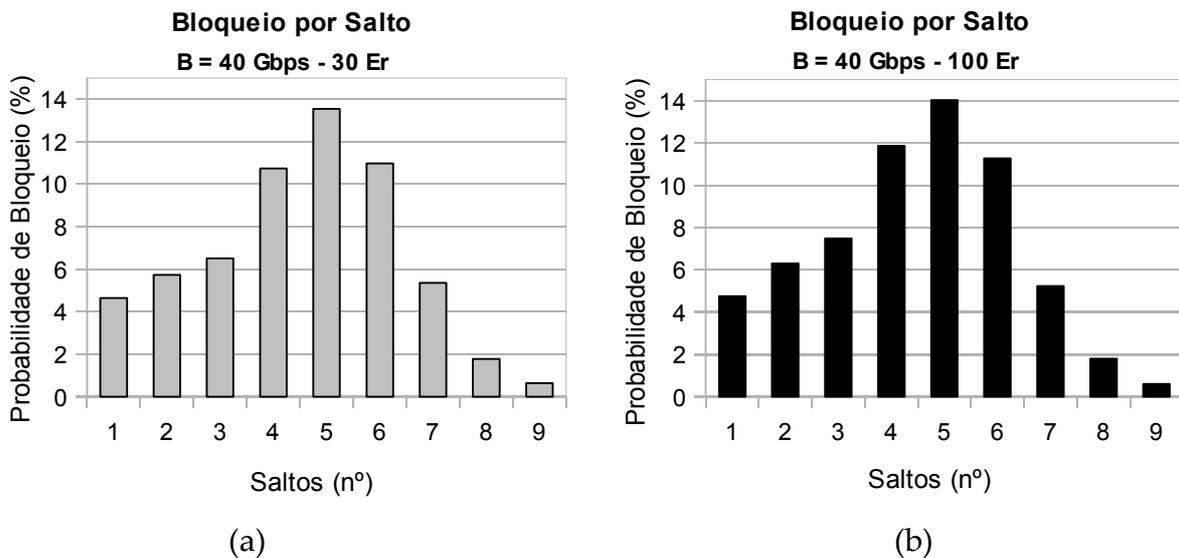


Figura 4.5: Equidade para taxa de 40 Gbps. (a) Tráfego de 30 Erlangs e (b) Tráfego de 100 Erlangs.

4.3 Estratégias de roteamento propostas

Como mencionado anteriormente, o algoritmo RWA tem como solução para cada requisição de conexão o conjunto: rota e comprimento de onda. Devido terem o melhor desempenho, menor custo computacional e complexidade, para os experimentos deste trabalho, foram utilizados a heurística *First-Fit* para a alocação de comprimento de onda e

o roteamento adaptativo (ou dinâmico), que utiliza como base o algoritmo de Yen, explicado em maiores detalhes na subseção seguinte.

4.3.1 Algoritmo de Yen

O algoritmo de Yen [YEN, 1971] destina-se a encontrar as k rotas mais curtas e que não contêm laços, podendo ser aplicado para grafos unidirecionais e bidirecionais. Para isso, o algoritmo usa a estratégia de rota de desvio, que funciona da seguinte forma [PAVANI, 2003]:

- Seja s o nó de origem, t o nó de destino, i o nó visitado, v o nó de desvio, p a rota candidata, X o conjunto de rotas candidatas,
- Primeiramente é formado um conjunto X de rotas candidatas, ou seja, as possíveis rotas que estão seguindo o parâmetro de qualidade estabelecido, neste caso, penalidade de PMD < 1dB, de onde será tirada a k -ésima rota mais curta p_k .
- Para se formar o conjunto X , se começa com a $(k - 1)$ -ésima rota mais curta e se considera cada nó da rota, exceto o nó de destino. O nó em consideração é chamado de nó de desvio e uma nova rota é formada para cada nó i , que estiver sendo visitado pelo algoritmo. A nova rota não possui laço e não pertence ao conjunto $\{p_1, p_2, \dots, p_{k-1}\}$.
- A nova rota é formada com a concatenação de p_{si} (a sub-rota de p_{k-1} do nó origem s até i) e p_{it}^* que é a rota mais curta de i ao nó destino t , satisfazendo a condição de que a nova rota concatenada não tem laço e não está em $\{p_1, p_2, \dots, p_{k-1}\}$. A concatenação de rotas é representada por $p_{si} \oplus p_{it}^*$.
- A rota mais curta é encontrada usando um algoritmo de rota mais curta, aqui é usado o algoritmo de *Dijkstra* [AHUJA, 1993], e esta rota é adicionada a uma lista de resultados (lista A , por exemplo). Além disso, ela é adicionada na pseudo-árvore de rotas mais curtas. Enquanto X não estiver vazio e o número de rotas obtidas for menor do que k , os seguintes passos são repetidos:

- Seja p_k a k rota mais curta, do nó origem s ao nó destino t , que acabou de ser inserida na lista A .
- Para cada nó v (nó de desvio) de p_k , exceto o nó de destino t , faça:
 - Seja p_{sv} a sub-rota de p_k do nó s ao nó v . Esta sub-rota é chamada de “rota raiz”. Remova do grafo todos os nós de p_{sv} , exceto o nó v (isto também remove as arestas entre esses nós). Isto garante que não haverá nenhum ciclo na nova rota.
 - Remova todas as arestas que saem do nó de desvio v para qualquer aresta usada pelas rotas na lista A e que tem a mesma rota raiz. Ou seja, remova todas as arestas que seguem o nó de desvio e pertencem à pseudo-árvore de k -rotas mais curtas.
 - Ache a rota mais curta p_{vt}^* no grafo remanescente, do nó v ao nó t . Essa rota é chamada de *spur*.
 - A concatenação $p_{sv} \oplus p_{vt}^*$ é formada e inserida em X .
- A rota mais curta é removida de X , se torna p_{k+1} e é inserida na lista A . Além disso, p_{k+1} é inserida na pseudo-árvore de k -rotas mais curtas.

Para aumentar a eficiência deste algoritmo, X pode ser implementado como uma fila de prioridade binária. A fila de prioridade é uma maneira eficiente e conveniente de se ordenar as rotas inseridas e se tem a rota mais curta sempre como primeiro elemento. Há outros algoritmos para se calcular as k rotas mais curtas de um grafo. Uma boa fonte de comparação entre o algoritmo de Yen e esses outros algoritmos é apresentado em [BRANDER, 1995].

4.3.2 RWA-Distância

Algoritmos RWA tradicionais bloqueiam requisições em redes dinâmicas baseados somente na restrição de continuidade de comprimento de onda [RAMASHWAMI, 1995]. Da mesma forma, o algoritmo RWA-distância implementado neste trabalho também bloqueia requisições somente baseado na restrição de continuidade de comprimento de

onda. No processo de escolha da rota, o algoritmo de Yen é utilizado para encontrar as k -ésimas menores rotas [AHUJA, 1993], onde o comprimento de um dado enlace, ou a distância entre dois nós vizinhos quaisquer da rede, é definido como o seu custo. O algoritmo RWA-distância usa como estratégia de alocação de comprimento de onda o algoritmo *First-Fit* [ZANG, 2001].

Portanto, para este algoritmo, nenhuma limitação da camada física é levada em conta no processo de admissão de conexões e devido a isso, no âmbito deste trabalho os algoritmos RWA-distância poderiam também ser denominados de PMD-Cegos [FONSECA, 2005].

4.3.3 RWA-PMD

O Algoritmo RWA-PMD proposto neste trabalho avalia a probabilidade de bloqueio das conexões, não só quanto à disponibilidade ou não de rota e comprimento de onda, como também mediante uma métrica de QoT pré-estabelecida. Como o objetivo do trabalho é estudar o impacto de estratégias de roteamento sobre o desempenho da rede, o efeito de PMD, que é um efeito inerente à escolha da rota, foi avaliado e escolhido como métrica de QoT.

A Figura 4.6 apresenta o fluxograma do algoritmo proposto neste trabalho. Como pode ser visto, depois de gerada a requisição da conexão, de acordo com o estado atual da rede, o que configura um roteamento adaptativo [RAMASHWAMI, 2002], o algoritmo de Yen procura dentre todas as possibilidades as k -ésimas melhores rotas entre a origem e o destino. O custo de cada enlace da rede foi definido no Capítulo 3 de acordo com as Equações 3.1 e 3.2, e a penalidade total da rota, de acordo com o modelo matemático definido na Equação 3.3, mostrados novamente abaixo.

$$\Delta t = D_{PMD} \sqrt{L} \quad (3.1)$$

$$Penalidade(dB) \approx 26 \cdot \left[\frac{(\Delta t)^2}{T^2} \right] \cdot \gamma (1 - \gamma) \quad (3.2)$$

$$Penalidade_{ij}(dB) = \sum_{k=1}^H P^k(dB) \quad (3.3)$$

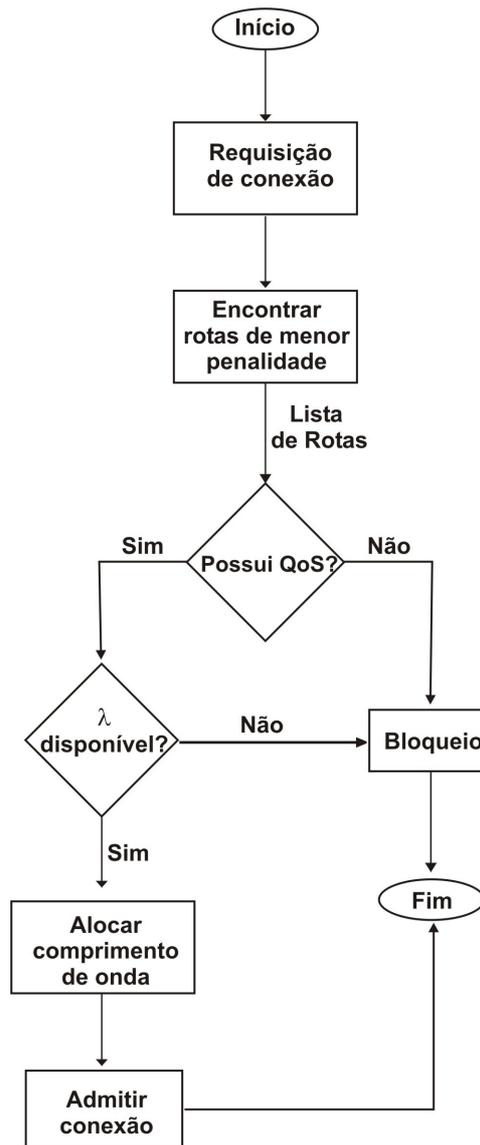


Figura 4.6: Fluxograma do algoritmo RWA-PMD.

Após a execução do algoritmo de roteamento, elege-se portanto, dentre o conjunto total de possíveis rotas na rede, um subconjunto contendo as k rotas com menor penalidade imposta pelo PMD. Dentre o subconjunto das k melhores rotas, o critério de

QoT óptico definido, $Penalidade \leq 1 \text{ dB}$, é testado e as rotas que atendem a este critério são escolhidas como rotas candidatas à alocação. A disponibilidade de comprimento de onda nas rotas candidatas é verificada em seguida, usando-se o algoritmo *First-Fit*, e partir daí é decidida a admissão ou bloqueio da conexão.

Enfim, percebe-se que, da forma que foi implementado o algoritmo RWA-PMD, no caso da rota de menor custo já estar em uso, com todos os comprimentos de onda ocupados ou mesmo não atendendo o QoT exigido, é possível que a segunda melhor rota seja utilizada para estabelecer a conexão e dessa forma obter um melhor desempenho da rede.

4.4 Resultados

Nesta seção, será apresentado o cenário de simulação utilizado, quais parâmetros foram escolhidos para os experimentos, os resultados que puderam ser colhidos e as análises deles.

4.4.1 Cenário estudado

Através de um ambiente de simulação estruturado, utilizando a linguagem de programação C, foi simulado um cenário dinâmico, no qual foram geradas 100000 requisições de conexões que possuem um padrão de tráfego uniforme entre os nós da rede e seguem uma distribuição *poissoniana*, tendo duração com distribuição exponencial (média = 1s).

A Rede Óptica utilizada é transparente, ou seja não possui conversão óptica-elétrica-óptica, e possui 19 nós, com todos os enlaces bidirecionais. Amplificadores ópticos ideais para compensar as perdas dos L km de fibra conectando dois nós adjacentes são aplicados, sendo que L varia entre 80 e 240 km. É usado um conjunto de 12 comprimentos de onda em uma rede óptica sem conversão de comprimento de onda. A topologia da rede simulada é ilustrada na Figura 4.7, a NSFNET-2, modelo real da rede óptica

americana, usada por pesquisadores do mundo inteiro em seus experimentos.

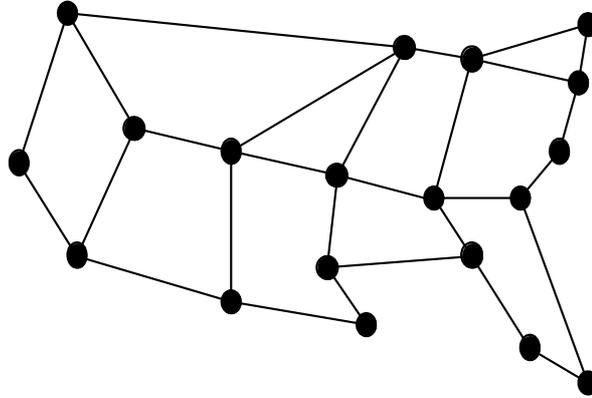


Figura 4.7: Rede utilizada nas simulações.

Para avaliar o impacto do efeito de PMD de forma mais completa possível na rede, foram feitas simulações numéricas para as taxas de transmissão de 2,5, 10 e 40 Gbps. Foram consideradas também três possibilidades de distribuição de fibra óptica para os enlaces da rede, de acordo com o componente D_{PMD} , onde fibras mais antigas possuem o valor desse coeficiente mais alto e as de fabricação mais recente mais baixo, demonstrando uma menor influência da PMD [RAMASHWAMI, 2002], conforme explicado na seção 3.1, do capítulo 3. Dessa forma, foi considerado o valor de $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ para as fibras de fabricação mais recente e $1,8 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ para as de fabricação mais antigas. No caso da rede possuir enlaces mistos, o simulador atribui $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ para 50% dos enlaces da rede e $1,8 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ para a outra metade. De acordo com essas possibilidades de cenário, as requisições de conexão que possuem penalidade devido ao PMD maior que 1 dB são bloqueadas por não atenderem ao critério de QoT exigido na rede.

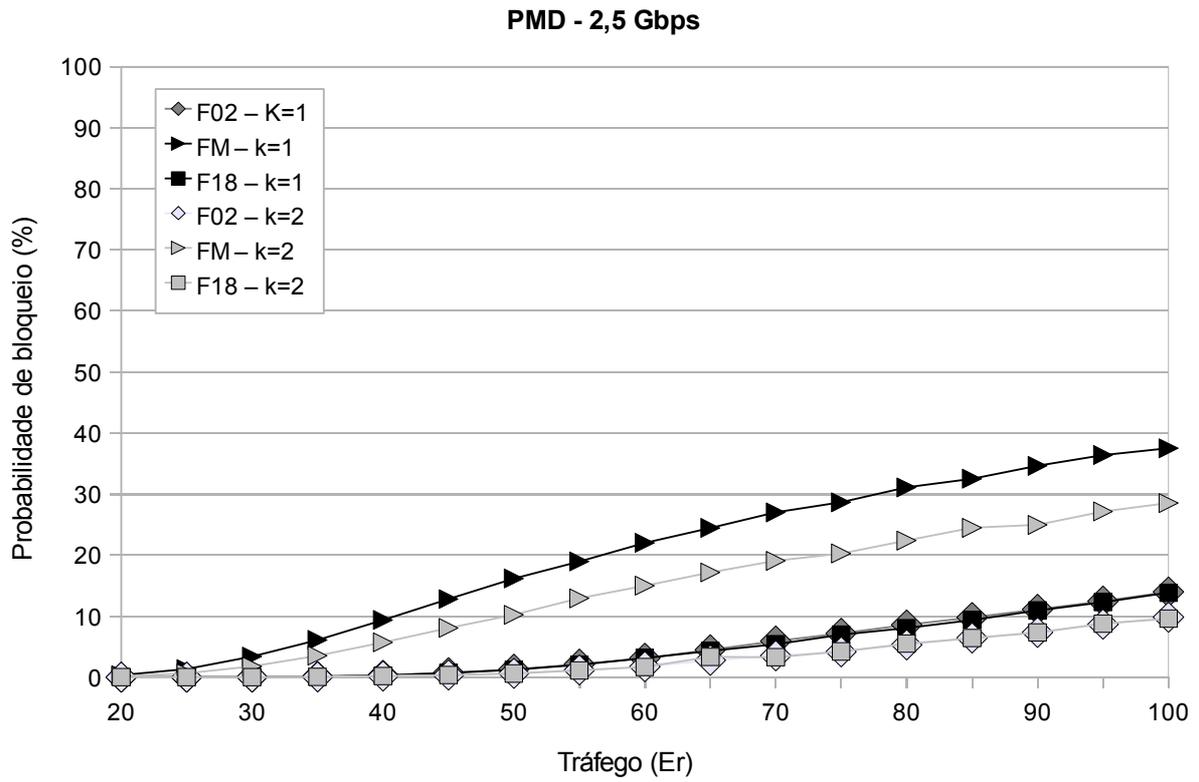
A partir desses parâmetros, são verificadas e analisadas a Probabilidade de Bloqueio, Probabilidade de Violação do Limiar (TVP) e Equidade da rede.

4.4.2 Impacto da estratégia de roteamento

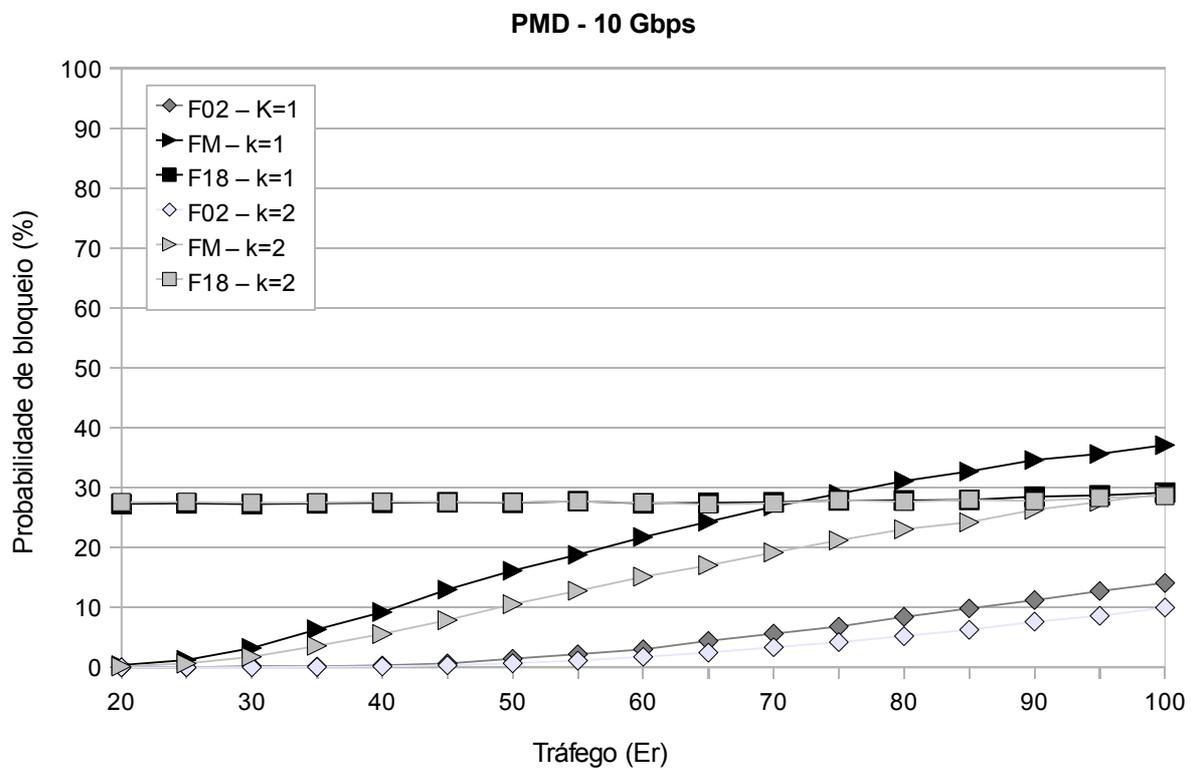
A idéia principal deste trabalho é mostrar que o uso de uma estratégia simples de roteamento pode melhorar sensivelmente o desempenho de redes ópticas impactadas por um efeito inerente ao roteamento, como por exemplo o PMD.

Como pode ser visto na Figura 4.8, o uso de uma rota alternativa na rede melhora o seu desempenho em cerca de 45% numa rede com fibras ópticas de $D_{\text{PMD}}=0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$, independente da taxa de transferência. Para a rede com fibras de $D_{\text{PMD}}=1,8 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ operando na taxa de 2,5 Gbps (4.8 (a)), a melhora fica em torno dos 40% e cerca de 15% na taxa de 10 Gbps (4.8 (b)). Já na rede composta por fibras mistas, há um benefício em torno de 15% quando estão operando nas taxas de 2,5 e 10 Gbps (4.8 (a) e (b)).

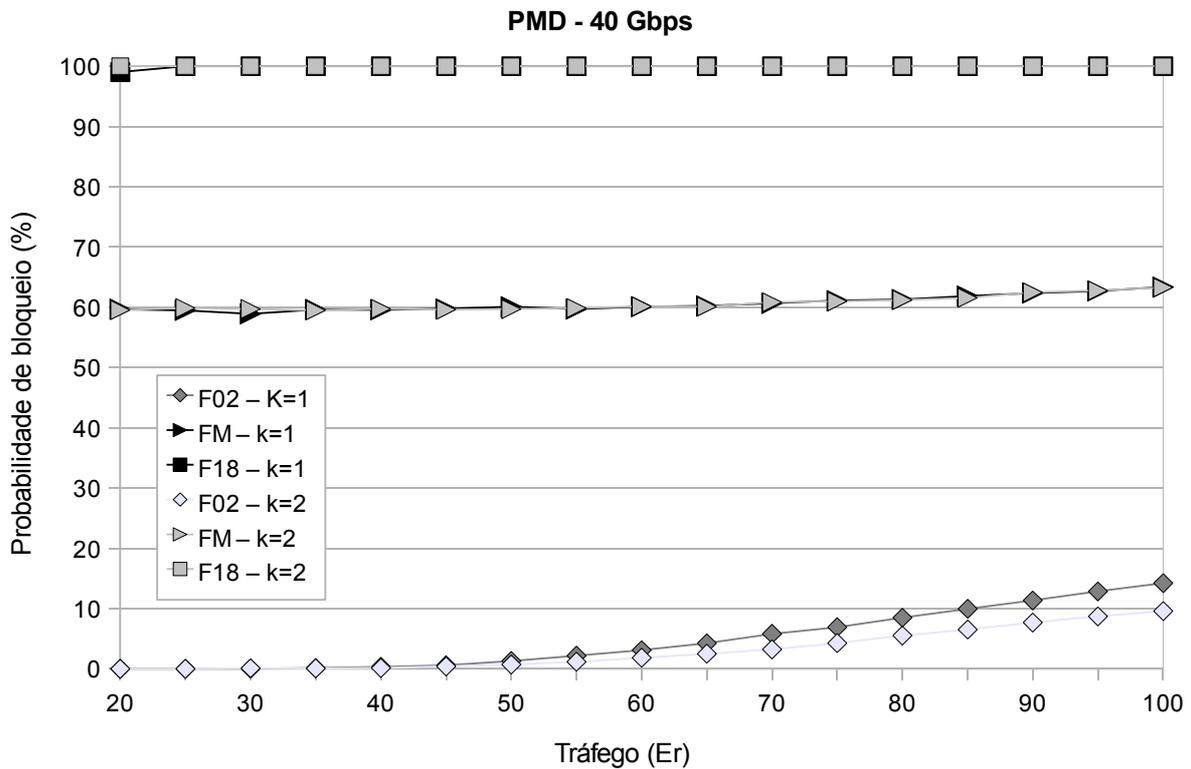
A exceção acontece para os casos onde a rede opera a altas taxa de transmissão, como por exemplo 40 Gbps (4.8 (c)). Neste caso, praticamente não existe melhora no desempenho, o que está de acordo com a Equação 3.2, pois a penalidade introduzida pelo PMD cresce com o quadrado da taxa de transmissão.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.8: Comparação da probabilidade de bloqueio para rede com fibras de $D_{PMD} = 0,2$ (F02), fibras de $D_{PMD} = 1,8$ (F18) e fibras mistas (FM), utilizando o algoritmo RWA-PMD com 1 ou 2 rotas (k). Sendo, (a) $B = 2,5$ Gbps, (b) $B = 10$ Gbps e (c) $B = 40$ Gbps.

4.4.3 Impacto do efeito de PMD

Com o enorme volume de informações geradas a partir dos experimentos, foi possível demonstrar o comportamento da rede diante do critério de qualidade de transmissão estabelecido. Foram identificados claramente quais fatores são imprescindíveis para que, no que diz respeito a limitações impostas pelo PMD na rede, uma estratégia simples de roteamento pode melhorar sensivelmente o desempenho da rede.

A Figura 4.9 mostra a probabilidade de bloqueio para os algoritmos RWA-PMD e RWA-distância numa rede com fibras mistas e operando a taxa de transmissão de 2,5 Gbps. Como esperado, é possível verificar que quando se considera apenas a distância

entre origem e destino como custo para o cálculo da rota, ou seja quando a rede opera com o algoritmo RWA-distância, a taxa de bloqueio, que é apenas por continuidade de comprimento de onda, é menor. Já considerando o PMD, percebe-se que mesmo com pouco tráfego na rede há uma resposta de probabilidade de bloqueio, que se deve justamente ao não atendimento do QoT estipulado (penalidade < 1dB), o que é diretamente proporcional ao aumento do tráfego. Perceba também que quando o algoritmo RWA-PMD opera com uma rota alternativa, ou seja com $k=2$, a probabilidade de bloqueio apresenta uma melhora da ordem de 25% para tráfego alto e médio.

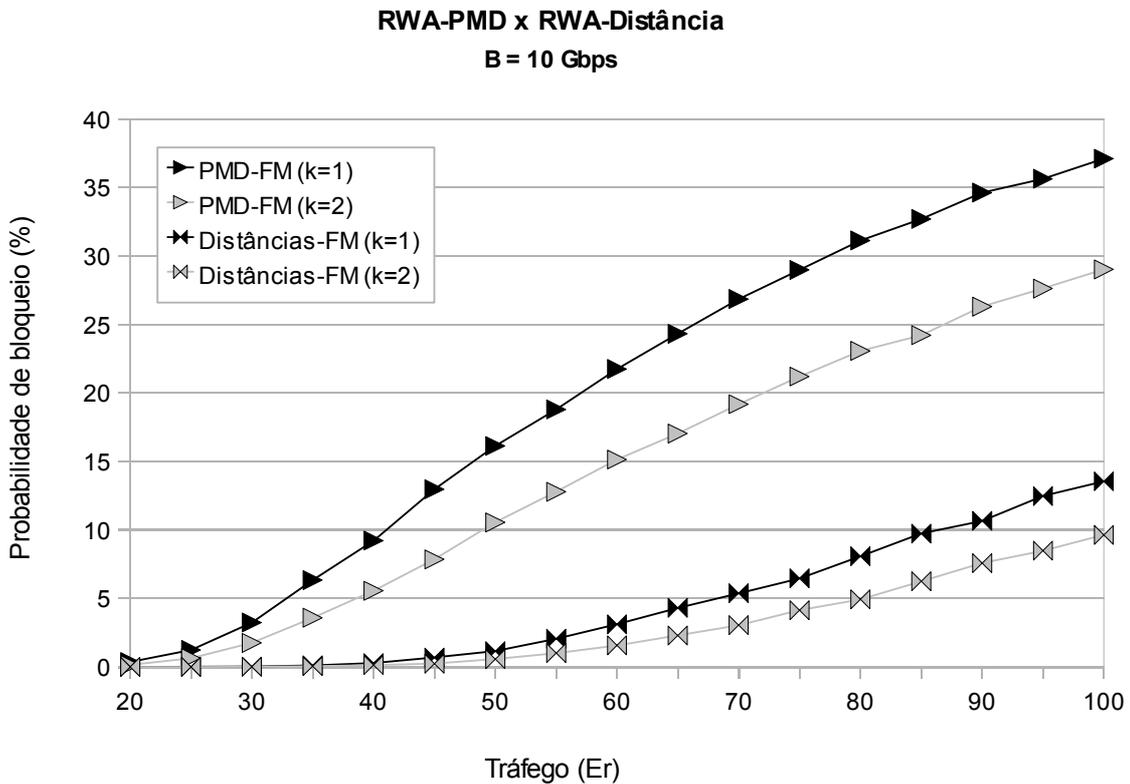


Figura 4.9: Rede constituída de enlaces com fibras mistas. RWA-PMD x RWA-Distâncias.

Uma das principais observações que também pôde ser extraída diante das simulações, foi quanto à utilização de fibras de fabricação mais recente e que por isso, têm uma menor sensibilidade aos efeitos do PMD. Há uma diferença considerável entre quando a rede utiliza apenas fibras recentes e as de fabricação mais antiga na

probabilidade de bloqueio, à medida que vai aumentando a taxa de transmissão, levando os índices de bloqueio a menos de 20% na rede com fibras que foram fabricadas com a preocupação de melhorar esse tipo de degradação do sinal óptico, independentemente da taxa. Isto pode ser visualizado na Figura 4.10, que mostra os índices de bloqueio para um tráfego de 100 Erlangs.

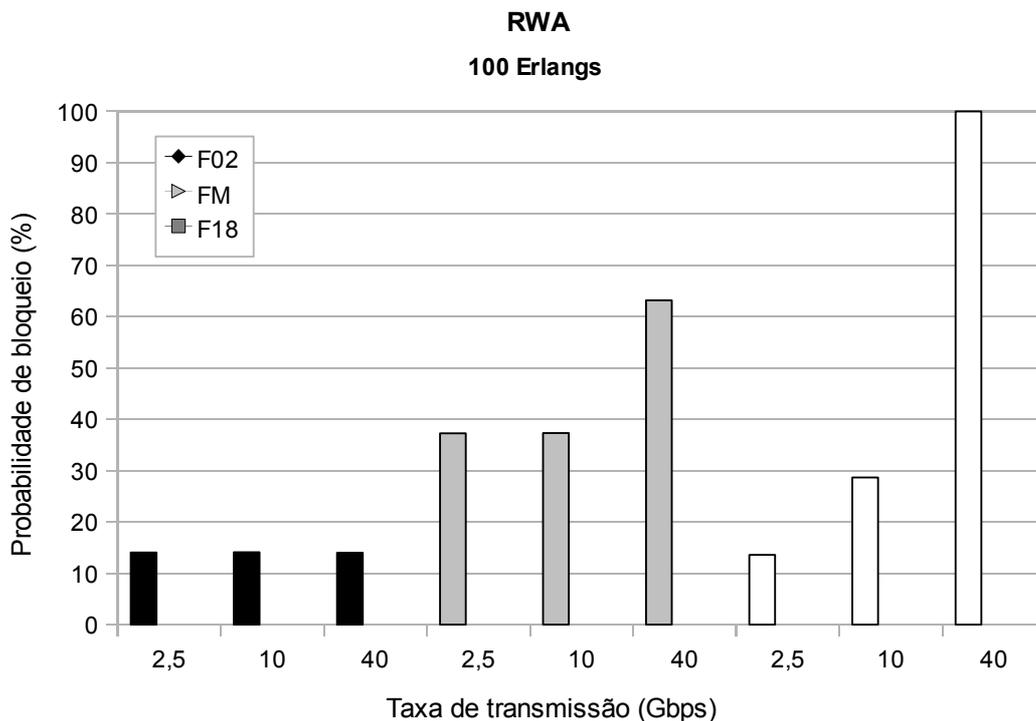
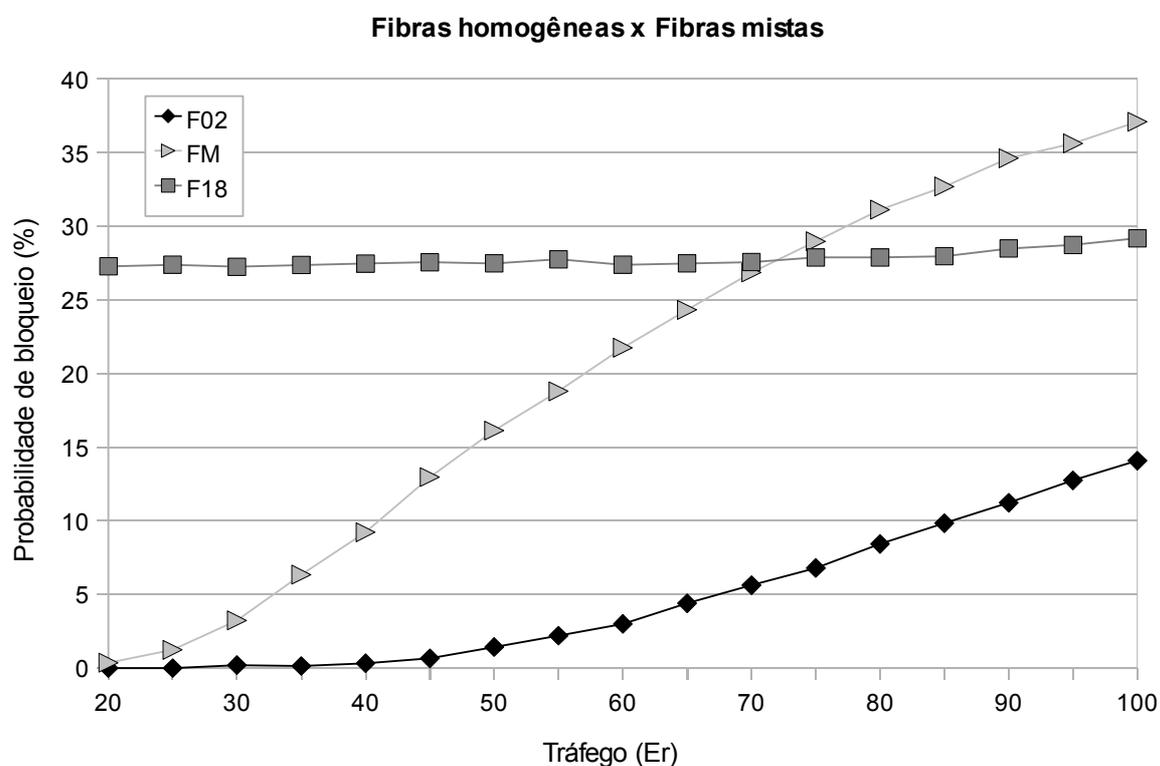


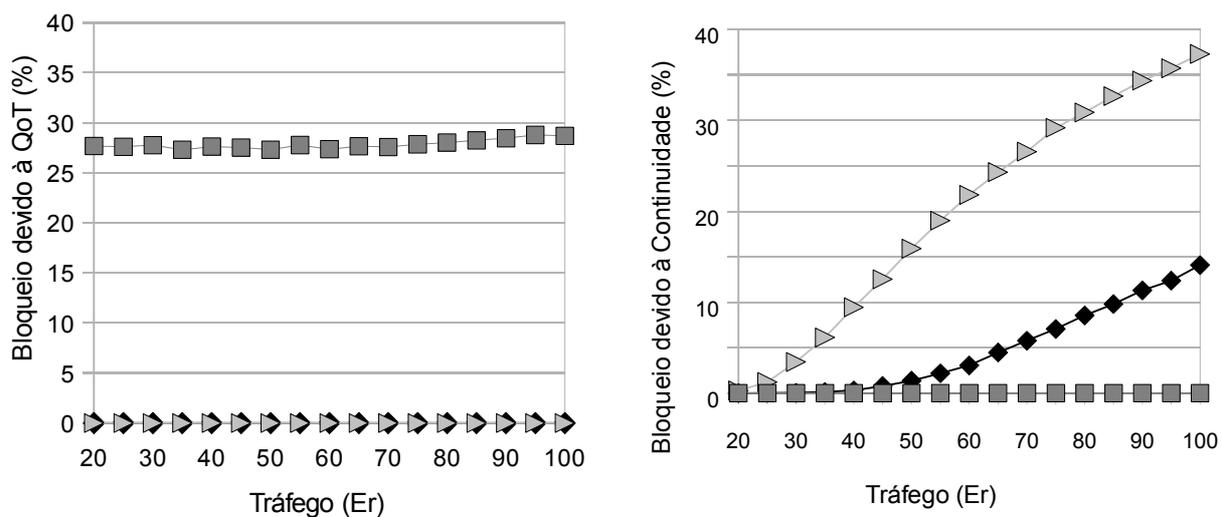
Figura 4.10: Rede com enlaces compostos com fibras de $D_{\text{PMD}} = 0,2$ (F02), fibras de $D_{\text{PMD}} = 1,8$ (F18) e fibras mistas (FM). RWA-PMD, considerando o tráfego de 100 Erlangs, com $k=1$.

Também pode ser observado que para uma baixa taxa de transmissão (2,5 Gbps), quando a rede possui fibras homogêneas, ou seja, todos os enlaces tendo o mesmo D_{PMD} , há um melhor desempenho, com taxas de menos de 20% de bloqueio. Enquanto a rede com fibras mistas pode ter a probabilidade de bloqueio chegando até 38% com a mesma taxa. Operando a 10 Gbps, a rede de fibras mistas ainda possui as maiores probabilidades de bloqueio (também em torno de 38%) quando se trata do tráfego de 100 Erlangs, porém as fibras mais sensíveis ao efeito do PMD possuem uma probabilidade de bloqueio na casa

dos 27% mesmo quando o tráfego é de apenas 20 Erlangs, como podemos observar na Figura 4.11 (a).



(a)



(b)

Figura 4.11: (a) Comportamento da probabilidade de bloqueio em Fibras Mistas e Homogêneas na taxa de 10 Gbps. (b) Continuidade *versus* QoT.

Essa diferença de probabilidade de bloqueio entre a rede que utiliza fibras homogêneas e a rede que utiliza fibras mistas, se deve ao fato de que o segundo tipo, devido à heterogeneidade, tem a composição de rotas com um maior número de enlaces e portanto rotas mais longas (o que pode ser visto na Figura 4.12), aumentando o índice de bloqueio quanto à continuidade de comprimento de onda. Conforme podemos observar na Figura 4.11 (b), que mostra o comportamento do bloqueio quanto à QoT e continuidade de comprimento de onda a uma taxa de 10 Gbps, a rede de fibras mistas tem o bloqueio apenas por continuidade de comprimento de onda bem maior do que a rede de fibras com $D_{\text{PMD}}=0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$, que também só tem bloqueios por continuidade, e a rede com fibras de $D_{\text{PMD}}=1,8 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ tem bloqueio apenas quanto à QoT.

Com base nas limitações verificadas para os algoritmos que encontram rotas longas, é importante fazer uma análise do comportamento da rede mediante a Equidade. Observando a Figura 4.12, que apresenta o bloqueio por quantidade de saltos, podemos ver o formato da equidade da rede, e o aumento de bloqueio para as rotas ditas longas, de acordo com o cálculo do comprimento de interferência na Equação 4.2, numa porcentagem maior que as rotas curtas, independente do motivo, continuidade de comprimento de onda e ou QoT, já que é cumulativo e portanto, maior quanto mais enlaces possuir rota.

Confirmando os dados já apresentados nesta seção, a rede de fibras mistas possui rotas mais longas, até 9 saltos, enquanto a rede de fibras com $D_{\text{PMD}}=0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ possui rotas com até 7 saltos, mostrando que há um maior número de conexões satisfeitas quando as rotas são mais curtas. Além disso, analisamos que há um baixíssimo bloqueio para 1, 2 e 3 saltos nas redes com $D_{\text{PMD}}=1,8 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$, o que se agrava para as rotas de maior tamanho.

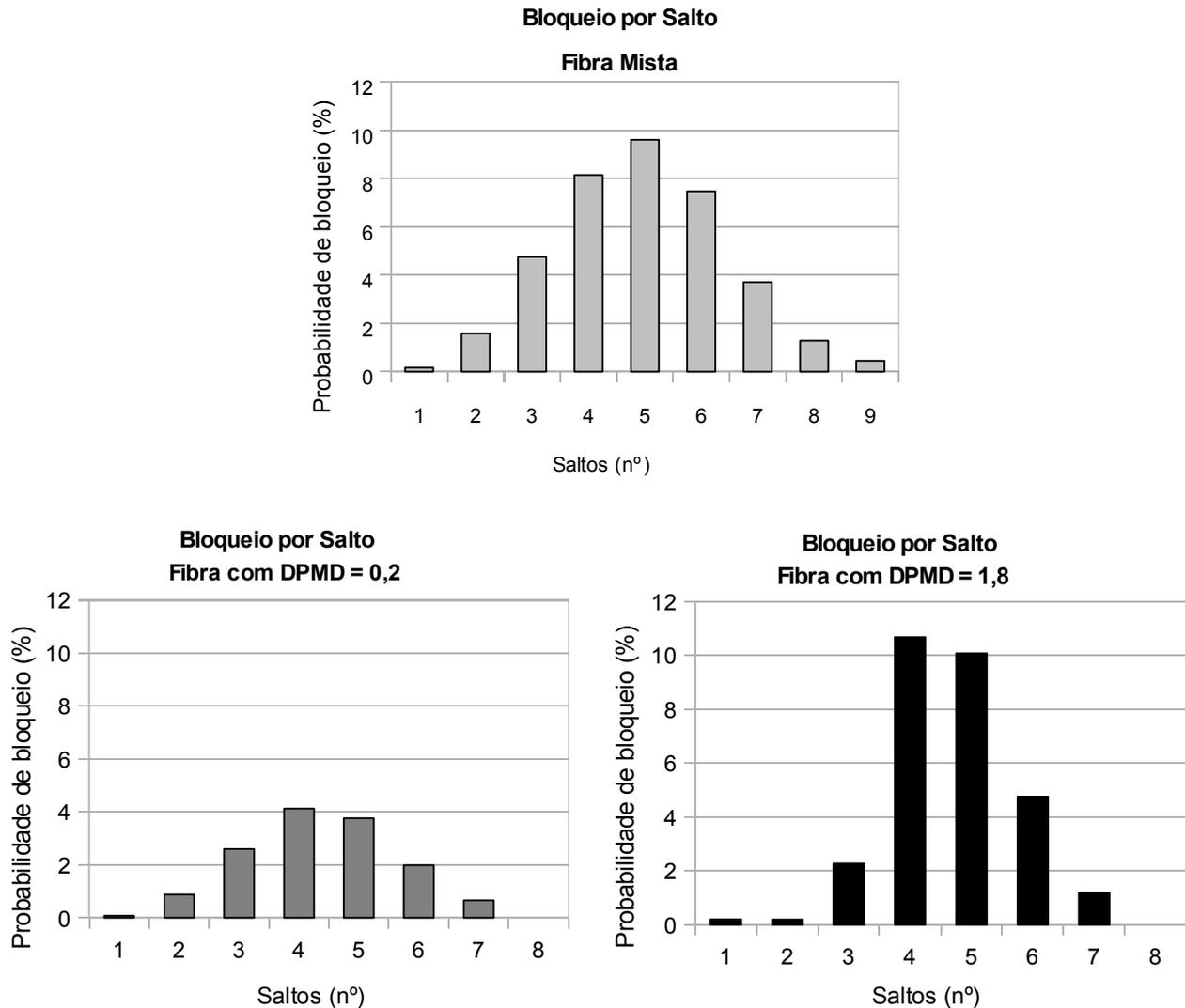


Figura 4.12: Bloqueio por quantidade de saltos, na taxa de transferência de 10 Gbps, com tráfego de 100 Er. Redes mista e homogêneas.

Uma outra estratégia que pode ser utilizada pelos projetistas da rede óptica para que se tenha uma resposta imediata na melhora da probabilidade de bloqueio das conexões é o fornecimento de um maior número de comprimentos de onda disponíveis para as requisições. Foram repetidos os experimentos com uma rede similar a da Figura 4.11, sendo que neste exemplo, foram utilizados 18 comprimentos de onda ($W=18$).

Na figura 4.13, verificamos que há uma melhora na probabilidade de bloqueio em torno de 15% para a rede de fibras mistas e de 11% no caso de rede com fibras de fator $D_{\text{PMD}}=0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$, enquanto para a rede com fibras de fator $D_{\text{PMD}}=1,8 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ esta

medida não surtiu efeito, deixando as taxas no mesmo nível, pois como os bloqueios para este tipo de rede são por QoT, o aumento do número de comprimentos de onda não influencia.

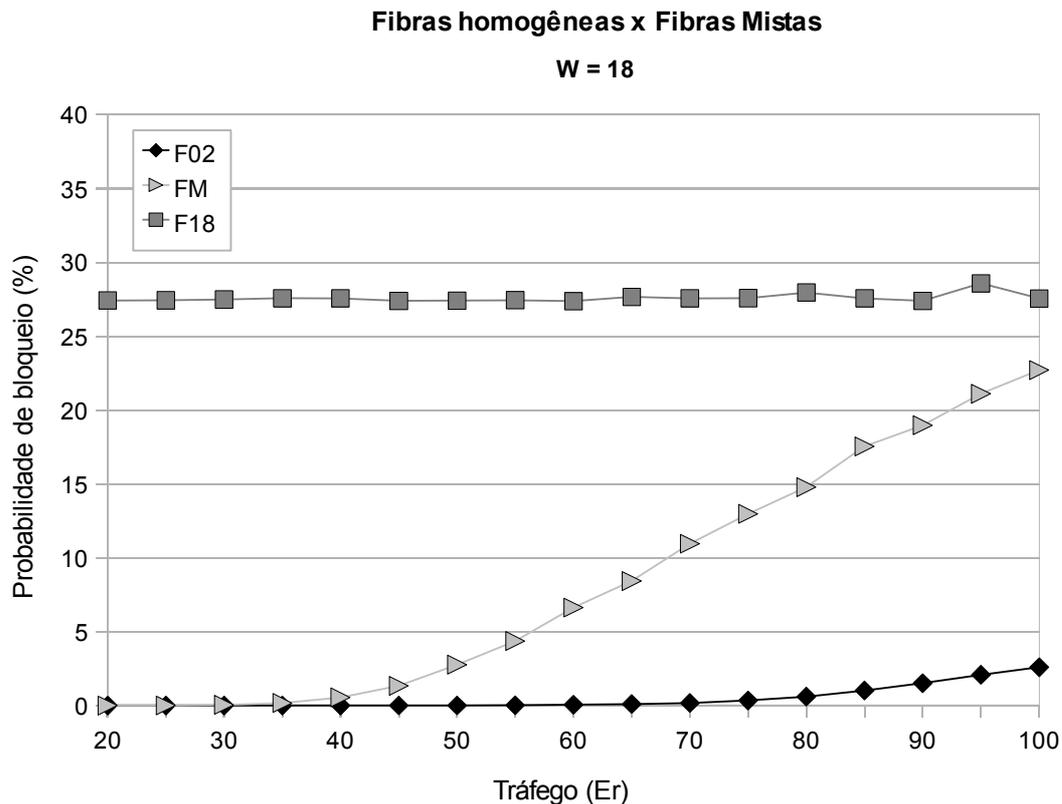


Figura 4.13: Probabilidade de bloq. numa rede operando a 10 Gbps e com W=18.

Para que se possa comprovar a importância de ter um algoritmo consciente das degradações do meio físico (IA-RWA) trabalhando na rede, foram refeitas todas as simulações propostas, porém com bloqueio apenas por continuidade de comprimento de onda. Assim, é possível observar que a admissão de conexões sem qualidade de transmissão e analisar o impacto negativo que isto pode trazer para o desempenho das aplicações que trafegam na rede. Com isso, temos uma visão da relação entre a probabilidade de bloqueio e a probabilidade de violação de limiar (TVP), podendo ratificar a importância da monitoração dos efeitos limitantes e do uso de algoritmos de roteamento que primem pela qualidade do sinal.

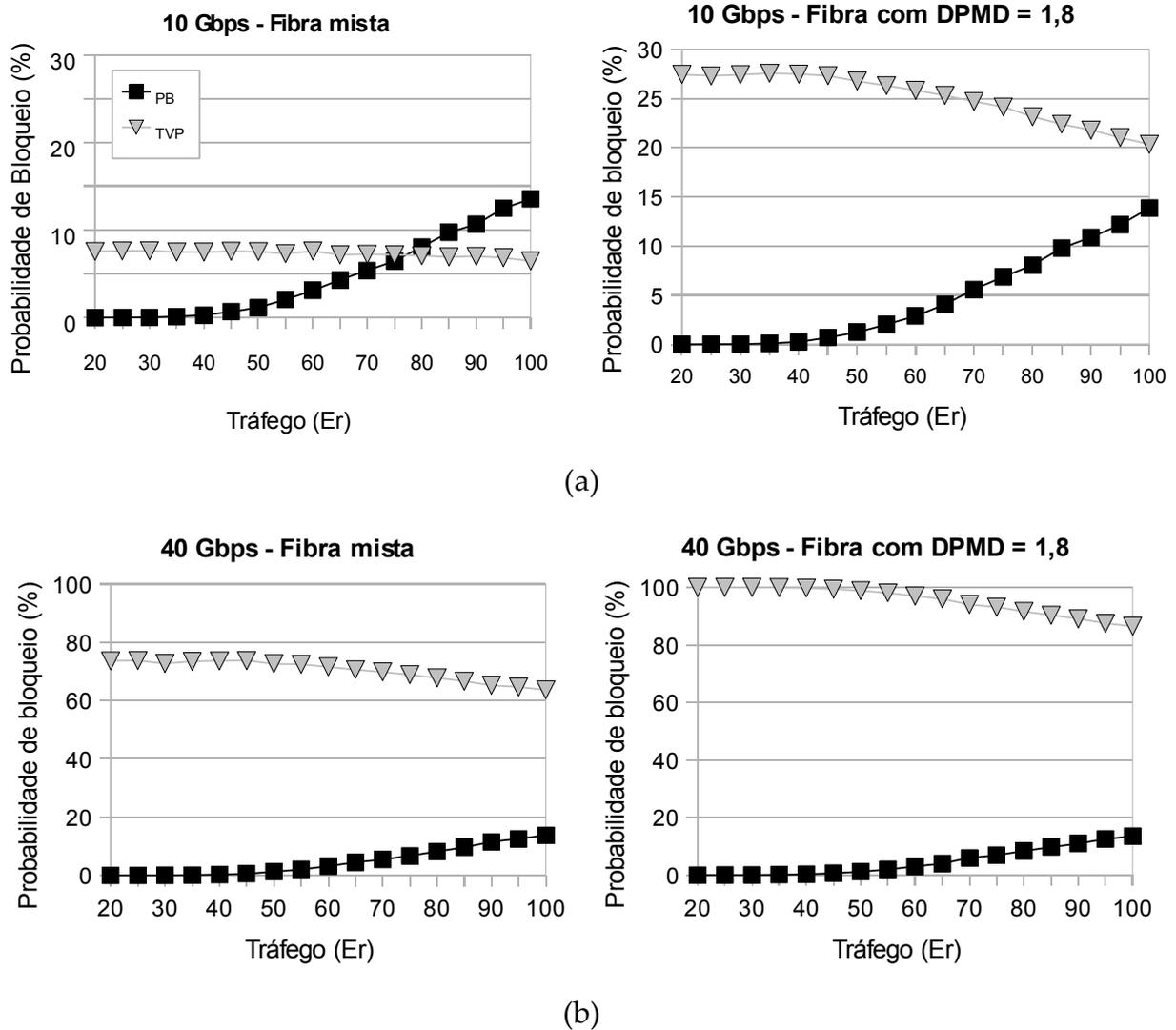


Figura 4.14: Probabilidade de bloqueio x TVP. (a) Rede de fibras mistas e rede com fibras de DPMD=1,8 – B=10 Gbps. (b) Rede de fibras mistas e rede com fibras de DPMD=1,8 – B=40 Gbps.

Como visto na Figura 4.14, as redes que não trabalham com o algoritmo RWA-PMD, têm uma porcentagem considerável de conexões ativas sem QoS. Estes índices são de 8% a 28% em redes operando com a taxa de 10 Gbps e acima de 72% para as taxas de transmissão de 40 Gbps, o que configura uma rede com péssimo desempenho. Nota-se também que independente da taxa de transmissão ou do tipo de fibra utilizadas, a probabilidade de bloqueio é inversamente proporcional à TVP mesmo quando o bloqueio é apenas por continuidade de comprimento de onda, ou seja, quanto mais conexões longas

ou com maior probabilidade de ter acúmulo de PMD forem bloqueadas, menor é o índice de TVP.

4.5 Sumário

Neste capítulo foi discutida a relação do algoritmo RWA com o contrato de serviço óptico acordado entre a rede óptica e as redes clientes, de forma que as rotas escolhidas tenham QoT, considerando a penalidade de PMD, efeito que foi considerado nos experimentos. Além disso, também foram explicadas as estratégias de roteamento propostas como solução para melhorar a relação de compromisso entre QoT e desempenho da rede. Então, foi descrito o cenário utilizado nas simulações e os testes realizados, os quais foram analisados mediante métricas de avaliação de algoritmo de roteamento, como por exemplo a probabilidade de bloqueio, mostrando que estratégias simples podem prover uma melhora sensível no desempenho das redes ópticas. No capítulo 5, serão descritas as conclusões retiradas dessa pesquisa e os trabalhos futuros propostos.

Capítulo 5

Conclusões e trabalhos futuros

A PMD pode trazer sérios problemas no que diz respeito à QoT na transmissão através de redes ópticas, provando ser um importante obstáculo em sistemas de alta velocidade operando a partir de 10 Gbps. Porém, esses transtornos podem ser melhorados através de algumas alternativas que foram demonstradas pelos experimentos desta dissertação.

No caso das redes que possuem fibras com D_{PMD} mais alto, foi visto que uma maneira de melhorar de forma relevante a probabilidade de bloqueio das conexões, é utilizar o algoritmo RWA-PMD com o uso de uma rota alternativa e assim assegurar um maior número de requisições de conexão atendidas. É válido lembrar que, esta estratégia demonstra melhora também para as redes constituídas de enlaces com outras composições de fibra.

O efeito causado por esse fator degradante é muito pior na rede composta por fibras que possuem um maior componente D_{PMD} , principalmente se tratando de altas taxas de

transmissão, pois a penalidade introduzida pelo PMD cresce com o quadrado da taxa de transmissão.

No caso da rede com enlaces de fibras mistas (mais próxima da realidade), principalmente em altas taxas de transmissão, poderá ser investigado em um trabalho futuro o desenvolvimento de um novo algoritmo de roteamento. Este algoritmo deve buscar dentro das possibilidades existentes, um caminho com a menor quantidade possível de enlaces, para que assim sejam evitados os bloqueios por não-continuidade de comprimento de onda e, conseqüentemente, acúmulo da penalidade de PMD.

Diante disso, a importância do uso de um algoritmo de roteamento que leve em consideração efeitos degradantes da camada física da rede óptica foi demonstrada, com o intuito de antecipar e poder encontrar soluções reais para os sistemas ópticos que trabalham a altíssimas velocidades se tornarem praticáveis em termos de qualidade de transmissão. Uma outra vantagem das soluções propostas é a viabilidade de implantação em redes já em operação, já que não se torna necessária a instalação de novos equipamentos para que elas sejam utilizadas de fato.

Finalmente, é importante lembrar que existem inúmeros outros efeitos que comprometem a qualidade do sinal óptico no decorrer da rota. O que também se torna uma proposta de continuidade deste estudo, injetar outros efeitos simultaneamente com a PMD e com isso fazer experimentos mais amplos e aprofundados. Dessa forma, será possível encontrar mais fatores variantes para qualidade do sinal e alternativas para definir a melhor estratégia de roteamento para a transmissão através desse meio.

Referências bibliográficas

AHUJA, R. K.; Magnanti, T.L.; Orlin, J. B. "Network Flows - Theory, Algorithms, and Applications", Prentice -Hall, 1993.

ALI, M.; Tancevski, L. "Impact of Polarization-Mode Dispersion on the Design of Wavelength-Routed Networks", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 14, pp. 720-722, May 2002.

BARRY, R. A.; Humblet, P. A. "Models of Blocking Probability in Alloptical Networks with and without Wavelength Changers", IEEE - Journal on Selected Areas Communications, Vol. 14, Jun 1996.

BRANDER, A. W.; Sinclair, M. C. "A comparative study of k-shortest path algorithms." In 11th UK Performance Engineering Workshop, pages 370–379, September 1995.

BRODSKY, M.; Frigo, N. J.; Boroditsky, M.; Tur, M. "Polarization mode dispersion of installed fibers", IEEE - Journal of Lightwave Technology, 24(12), 4584–4599, 2006.

BUCHALI, F.; Bülow, H. "Adaptive PMD Compensation by Electrical and Optical Techniques", IEEE, 2004.

BULOW, H.; Ballentin, R.; Baumert, W.; Maisonneuve, G.; Thielecke, G.; Wehren, T. "Adaptive PMD mitigation at 10 Gbls using an electronic SiGe equalizer IC", European Conference on Optical Communication, ECOC'99,2: 138-139, 1999.

CARDILLO, R.; et al. "Considering transmission impairments in wavelength-routed networks", in Proc. IEEE ONDM 2005, Milan, Italy, Feb. 2005.

DENG, T.; Subramaniam, S. "Source Power Management in Transparent Wavelength-Routed Mesh Networks", in Proc. IEEE ICC'04, Jun 2004.

CHAVES, D. A. R. "Algoritmos rápidos de IRWA para redes totalmente ópticas", Dissertação de Mestrado, UFPE, 2008.

CHBAT, M., Soigne, W. J. P.; Lame, S.; et al. "Long-term field demonstration of optical PMD Compensation on an installed OC-192 link", Proc. Optical Fiber Communication Conference, OFC'99. Postdeadline paper PD12, 1999.

CURTI, F.; Daino, B.; DeMarchis, G.; Matera, F. "Statistical treatment of the evolution of the principal states of polarization in single-mode fibers", IEEE - Journal of Lightwave Technology, LT-8, 1162–1166, 1990.

- DENG, T.; Subramaniam, S. "Virtual Loops Effects in DWDM Networks with Dynamic Power Equalization", in Proc. IEEE ONDM'05 , Feb 2005.
- DESURVIRE, E. "Erbium-Doped Fiber Amplifiers", John Wiley Professio, 2002.
- FERES, M. M.; Trevelin, L. C. "RWA Algorithm Aware of PMD and ASE for All-Optical Networks", IEEE, 2009.
- FILHO, U. S. P.; Ribeiro, M. R. N.; Maioli, C. P.; Freitas, M.; Fonseca, I. E. "Cost Functions for CAC/RWA in Dynamic Optical Networks under GVD, SPM and XPM", Journal of Microwave and Optoelectronics, vol. 6, pp. 249-262, 2007.
- FILHO, J. F. M.; Filho, C. J. A. B.; Arantes, E. A. J.; Oliveira, S. C.; Coelho, L. D.; Oliveira, J. P. G.; Dante, R. G.; Fontana, E.; Nunes, F. D. "Novel Routing Algorithm for Transparent Optical Networks Based on Noise Figure and Amplifier", in Proc. IEEE IMOC2003, Sept 2003.
- FONSECA, I. E. "Uma Abordagem para Aprovisionamento e Diferenciação de QoS Óptico na Presença de FWM em Redes Ópticas Transparentes", Tese de Doutorado, FEEC/UNICAMP, 2005.
- FONSECA, I. E.; Ribeiro, M. R. N.; Almeida Jr, R. C.; Waldman, H. "Preserving Global Optical QoS in FWM Impaired Dynamic Networks", IEE Electronics Letters, Vol. 40, pp. 191-192, Feb 2004a.
- FONSECA, I. E.; Ribeiro, M. R. N.; Almeida Jr, R. C.; Waldman, H. "Meeting Optical QoS in Dynamic Networks with Reduced Complexity", in Proc. IEEE ECOC'04, Sept 2004b.
- FOSCHINI, G. J.; Poole, C. D. "Statistical theory of polarization dispersion in single mode fibers", IEEE - Journal of Lightwave Technology, LT-9, 1439-1456, 1991.
- GAGNAIRE, M.; Zahr, S. "Impairment-Aware Routing and Wavelength Assignment in Translucent Networks - State of the Art", IEEE, 2009.
- HINZ, S.; Sandel, D.; Yoshida-Dierolf, M.; et al. "Polarization mode dispersion compensation for 6 ps, 40 Gb/s pulses using distributed equalizer in LiNbOs", Elect. Lett. 35:1185-1186, 1999b.
- HUANG, Y.; et al. "Connection provisioning with transmission impairment consideration in optical WDM networks with high-speed channels", IEEE/OSA J. Ligthwave Technology, vol. 23. pp. 982-993, March 2005.

ISLAM, M. S.; Majumder, S. P. "Influence of polarization mode dispersion on the effect of cross-phase modulation in intensity modulation-direct detection WDM transmission system", IEEE, 2008.

KAMINOW, I.P.; Li, T.; Willner, A. E. "Optical Fiber Communications - Components and Subsystems", 5ª edição, Elsevier, 2008.

KAMINOW, I.P.; Li, T.; Willner, A. E. "Optical Fiber Communications - Systems and Impairments", 4ª edição, Elsevier, 2002.

KARLSSON, M.; Xie, C.; Sunnerud, H.; Andrekson, P. A. "Higher-order polarization mode dispersion compensator with three degrees of freedom", Proc. Optical Fiber Communication Conference, OFC'OI. Paper Mol, 2001.

KHOSRAVANI, R.; Havstad, S. A.; Song, Y. W.; Ebrahimi, P.; Willner, A. E. "Simultaneous PMD compensation of multiple WDM channels using a single compensator", Proc. European Conference on Optical Communication, ECOC 2000. 2:4546, 2000.

KILPER, D. C.; Bach, R.; Blumenthal, D. J.; Einstein, D.; Landolsi, T.; Ostar, L.; Preiss, M.; Willner, A. E. "Optical Performance Monitoring", IEEE/OSA J. Lighthwave Technology, Vol. 22, pp. 294-304, Jan 2004.

KULKARNI, P.; et al. "Benefits of Q-factor based routing in WDM metro networks", in Proc. ECOC 2005, Glasgow, U.K., Sept. 2005.

LANNE, S.; Idler, W.; ThiCry, J. P.; Hamaide, J. "Demonstration of adaptive PMD compensation at 40 Gbls", Proc. Optical Fiber Communication Conference, OFC'OI. Paper TuP3, 2001.

LANNE, S., Thikry, J. P.; Penninckx, D.; Hamaide, J.P.; Soigne, J. P.; Desthieux, B.; Le Briand, J.; Mace, L.; Gavignet, P. "Field optical PMD compensation at 10Gbls over installed fibre totaling 35ps of PMD", European Conference on Optical Communication, ECOC 2000. 3:207-208, 2000.

LIMA, M.A.C.; Araújo, A.F.R.; César, A.C. "Agregação Dinâmica de Tráfego em Redes Ópticas WDM Utilizando Algoritmo Genético", in Proc. MOMAG'04, Aug 2004.

LIU, X.; Xie, C.; Wijngaarden, A. J. V. "Multichannel PMD Mitigation and Outage Reduction Through FEC With Sub-Burst-Error-Correction Period PMD Scrambling", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, pp. 2183-2185, Sept. 2004.

MANOUSAKIS, K.; Christodoulopoulos, K.; Varvarigos, E. "Impairment-Aware Offline

RWA for Transparent Optical Networks", IEEE, 2009.

MANOUSAKIS, K.; Christodoulopoulos, K.; Varvarigos, E. "Avoiding Adjacent Channel Interference in Static RWA", IEEE, 2008.

MARTINEZ, R.; Pinart, C.; Comellas, J.; Junyent, G. "Routing issues in Transparent Optical Networks", in Proc. IEEE ICTON 2006, pp. 189 – 194, 2006a.

MARTINEZ, R.; Pinart, C.; Comellas, J.; Junyent, G. "Routing issues in Transparent Optical Networks", in Proc. IEEE ICTON 2006, pp. 189 – 194, 2006a.

MARTINEZ, R.; Pinart, C.; Cugini, F.; Andriolli, N.; Valcarenghi, L.; Castoldi, P.; Wosinska, L.; Comellas, J.; Junyent, G. "Challenges and Requirements for Introducing Impairment-Awareness into the Management and Control Planes of ASON/GMPLS WDM Networks", IEEE Communication Magazine, pp. 76 – 85, December 2006b.

MOLLER, L. "Broadband PMD compensation in WDM systems", Proc. European Conference on Optical Communication, ECOC 2000. 3: 159-160, 2000a.

MOLLER, L. "Filter synthesis for broad-band PMD compensation in WDM systems", IEEE Photon. Technol. Lett. 12: 1258-1260, 2000b.

NAGEL, J. A.; Chbat, M. W.; Garrett, L. D.; Soignb, J. P.; Weaver, N. A.; Desthieux, B. M.; Biilow, H.; McCormick, A. R.; Derosier, R. M. "Long-term PMD mitigation at 10 Gbls and time dynamics over high-PMD installed fiber", Proc. European Conference on Optical Communication, ECOC 2000.2:3 1, 2000.

NOE, R.; Sandel, D.; Hinz, S.; et al. "Integrated optical LiNbOs distributed polarization mode dispersion compensator in 20 Gbit/s transmission system", Elect. Lett. 35:652-654, 1999a.

NOE, R.; Sandel, D.; Yoshida-Dierolf, M.; et al. "Polarization mode dispersion compensation at 10, 20, and 40 Gbls with various optical equalizers", IEEE - Journal of Lightwave Technology, 17: 1602-1 616, 1999b.

ONO, T.; Yano, Y.; Garrett, L. D.; Nagel, J. A.; Dickerson, M. J.; Cvijetic, M. "10 Gb/s PMD compensation field experiment over 452 km using principal state transmission method", Proc. Optical Fiber Communication Conference, OFC 2000. PD-44, 2000.

OZEKI, T.; Yoshimura, M.; Kudo, T.; Ibe, H. "Polarization-mode dispersion equalization experiment using a variable equalizing optical circuit controlled by a pulse-waveform-comparison algorithm" Proc. Optical Fiber Communication Conference, OFC'94. 62-64, 1994.

- PAJNTAR, R.; Vidmar, M.; Suche, H.; Paoletti, A.; Schiffini, A. "PMD Penalty Monitor for Automatic PMD Compensation of 40-Gb/s RZ Data", IEEE, 2004.
- PATSCHER, J.; Eckhardt, R. "Component for second-order compensation of polarization-mode dispersion", *Elect. Lett.* 33: 1 157-1 159, 1997.
- PAVANI, G. S. "Roteamento e Alocação de Comprimentos de Onda com Restrições de Potência usando Algoritmos Genéticos", Dissertação de Mestrado, UNICAMP, 2003.
- PINART, C.; Junyent, G. "The INIM System: In-Service Non-Intrusive Monitoring for QoS-Enabled Transparent WDM", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 12, pp. 635-644, July/August 2006.
- PINART, C.; Junyent, G. "The INIM System: In-Service Non-Intrusive Monitoring for QoS-Enabled Transparent WDM", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 12, pp. 635-644, July/August 2006.
- POOLE, C. D.; Tkach, R. W.; Chraplyvy, A. R.; Fishman, D. A. "Fading in lightwave systems due to polarization-mode dispersion", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 3(1), 68-70, January 1991a.
- POOLE, C. D.; Winters, J. H.; Nagel, J. A. "Dynamical equation for polarization dispersion", *Opt. Lett.*, 16(6), 372-374, March 1991b.
- POOLE, C. D.; Wagner, R. E. "Phenomenological approach to polarization dispersion in long single-mode fibers", *Electron. Lett.*, 23, 1113-1114, 1986.
- RAMAMURTHY, B.; et al. "Impact of transmission impairments on the teletraffic performance of wavelength-routed optical networks", *IEEE/OSA J. Lighthwave Technology*, vol. 10. pp. 1713-1723, Oct. 1999.
- RAMASHWAMI, R.; Sivarajan, K.N. "Optical Networks: A practical Perspective", 2ª edição, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Francisco, California, U.S.A., 2002.
- RAMASHWAMI, R.; Sivarajan, K.N. "Routing and Wavelength Assignment in All-optical Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 3, Oct 1995.
- SANDEL, D., Hinz, S.; Yoshida-Dierolf, M.; et al. "Optical polarization-mode dispersion compensation of 2.4 bit durations of differential group delay at 40 Gbit/s", *Elect. Lett.* 351365-1367, 1999.
- SANDEL, D.; Yoshida-Dierolf, M.; Noe, R.; et al. "Automatic polarization mode dispersion

compensation in 40 Gbit/s optical transmission system", *Elect. Lett.* 34~2258-2259, 1998.

SCHLUMP, D.; Wedding, B.; Bulow, H. "Electronic equalization of PMD and chromatic dispersion induced distortion after 100km standard fiber at 10 Gb/s", *Proc. European Conference on Optical Communication, ECOC'98.* 535-536, 1998.

STRAND, J.; Chiu, A. "Impairments and other constraints on optical layer routing", *IETF RFC 4054*, May 2005.

WINZER, P. J.; Kogelnik, H.; Kim, C. H.; et al. "Receiver impact on first-order PMD outage", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 15(10), October 2003.

YAMADA, K.; Kudou, T.; Ozeki, T. "Simultaneous multi-channel PMD equalization for WDM systems", *Proc. Optical Fiber Communication Conference, OFC/OI.* Paper TuP2, 2001.

YEN, J. "Finding the k shortest loopless paths in a network", *Management Science*, vol. 17, pp. 712-716, July 1971.

ZANG, H.; et al. "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks", *SPIE Optical Network Magazine*, pp. 47-60, Jan. 2001.

Apêndice 1: Publicações relacionadas à Dissertação

GOMES, A. F.; Fernandes, C. E. M.; Oliveira, V. A. P.; Fonseca, I. E. “*Routing Techniques in Dynamic Optical Networks Impaired by PMD*”, Anais do IEEE IMOC 2009 – International Microwave and Optoelectronics Conference, Belém - PA, Nov. 2009.

GOMES, A. F.; Fernandes, C. E. M.; Oliveira, V. A. P.; Fonseca, I. E. “Estratégia de Roteamento em Algoritmos IA-RWA para Redes Ópticas – Uma avaliação da Dispersão de Modo de Polarização”, SBrT 2009 – Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Blumenau - SC, Out. 2009.

GOMES, A. F.; Fernandes, C. E. M.; Oliveira, V. A. P.; Fonseca, I. E. “Roteamento em Algoritmos IA-RWA em Redes Ópticas Limitadas por Dispersão de Modo de Polarização”, EPOCA 2009 – Escola Potiguar de Computação e suas Aplicações, Natal - RN, Nov. 2009.

Apêndice 2: Ambiente de Simulação

A pesquisa na área de interconexão óptica apóia-se sobre métodos analíticos ou computacionais. Métodos analíticos são preferíveis, mas a maioria dos trabalhos atualmente executados baseia-se em métodos computacionais, mais facilmente tratáveis. Ainda, mesmo quando o problema pode ser resolvido analiticamente, sua verificação em diferentes cenários é comumente computacional. Assim o principal instrumento de trabalho dos pesquisadores da área de conectividade óptica é a infra-estrutura computacional, como computadores e programas (*softwares*).

O simulador de redes ópticas utilizado nesta Dissertação foi desenvolvido no laboratório LASIC da UFERSA em linguagem de programação estruturada C, sendo que não utilizou-se nenhum simulador (*software*) comercial ou aberto, como por exemplo o *Network Simulator* (NS). O editor/compilador C utilizado foi Visual Studio, versão 2008.

A maioria das simulações mostradas nesta Dissertação foi realizada utilizando um computador com processador Pentium(R) D 2.8 GHz e com 512 Mbytes de memória RAM.