

**IVO ROBERTO BRASSOLATTI**

**DIMENSIONAMENTO DE REDES GMPLS  
COM BASE EM ALGORITMOS RWA**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia Elétrica

**São Paulo**

**2006**

**IVO ROBERTO BRASSOLATTI**

**DIMENSIONAMENTO DE REDES GMPLS  
COM BASE EM ALGORITMOS RWA**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia Elétrica

Área de Sistemas Digitais

Orientadora:  
Prof.<sup>a</sup> Dra.  
Regina Melo Silveira

**São Paulo**

**2006**

**Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.**

**São Paulo, 06 de maio de 2006.**

**Assinatura do autor** \_\_\_\_\_

**Assinatura do orientador** \_\_\_\_\_

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Brassolatti, Ivo Roberto**

**Dimensionamento de redes GMPLS com base em algoritmos RWA: verificação da influência do número de lambdas, do tipo algoritmo RWA e das estatísticas de falha no bloqueio de conexões, para dimensionamento de uma rede GMPLS com tráfego dinâmico / I.R. Brassolatti. -- ed.rev. -- São Paulo, 2006. 109 p.**

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais.**

**1.Roteamento óptico 2.Engenharia de redes I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II.t.**

À Ana Maria, minha esposa, com amor, admiração e gratidão por sua compreensão, carinho, presença e incansável apoio ao longo do período de elaboração deste trabalho e sempre.

## AGRADECIMENTOS

À Prof.<sup>a</sup> Dra Regina Melo Silveira, pela atenção e apoio durante os processos de definição e orientação deste trabalho.

À Escola Politécnica da USP e à MetroRED Telecomunicações Ltda, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

À minha irmã Luciana, ao amigo Flávio e Sabrina, sua esposa, pelas sugestões, apoio e correção do texto.

Aos meus pais e a toda minha família, que sempre me apoiaram e me incentivaram ao estudo.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram na elaboração deste trabalho.

"Todos os dias Deus nos dá um momento em que é possível mudar tudo que nos deixa infelizes. O instante mágico é o momento em que um 'sim' ou um 'não' pode mudar toda a nossa existência."

Paulo Coelho

## RESUMO

As redes atuais buscam a integração dos serviços e tendem ao IP/MPLS sobre DWDM. No futuro, espera-se que as redes sejam do tipo GMPLS, apresentando melhoria na flexibilidade, capacidade de comutação no meio óptico e também um plano de controle único. Tais redes poderão prover a integração de diferentes camadas e tecnologias, além de reduzirem os custos de operação e de provisionamento. Dentre os muitos aspectos desta nova tecnologia, o trabalho proposto concentra-se no estudo do roteamento óptico em redes GMPLS, verificando a relação existente entre algoritmos RWA e o dimensionamento das mesmas. Pesquisas mostram que, ao tentar estabelecer uma rota numa rede totalmente óptica e com tráfego dinâmico, o bloqueio de conexões e o número de falhas podem limitar o seu desempenho. Realizando-se simulações com algoritmos RWA, é possível determinar o número mínimo de comprimentos de onda e avaliar a melhor topologia de rede para uma determinada probabilidade de bloqueio de conexões e de falhas. Este trabalho mostra como simulações com algoritmos RWA auxiliam no dimensionamento de redes GMPLS permitindo determinar a influência destes algoritmos em seu desempenho. Como principais resultados estão o dimensionamento de recursos, a determinação da carga de tráfego de trabalho e da taxa de falha permitida e a seleção do melhor tipo de algoritmo RWA para a rede de pesquisa Kyatera em duas possíveis fases de sua implementação.

## **ABSTRACT**

Today's networks seek integration of services and tend towards lean IP/MPLS over DWDM. In the future, it is expected that the networks will tend towards GMPLS with enhanced flexibility and switching capability in the optical layer and a unified control plane.

Such networks will provide integration between different network layers and technologies, besides decrease operating and provisioning costs.

Among many aspects of this technology, this study concentrates on GMPLS network optical routing, verifying the relationship between RWA algorithms and network dimensioning. Research shows that when attempting to establish a route in an all-optical network with dynamic traffic, connection blocking and failures can limit performance. Through of RWA algorithms simulation, it is possible to determine the minimum wavelength number and check the best network topology for a given probability of connection blocking and failure. This work shows how RWA simulations can assist in the dimensioning of GMPLS networks and in determining the influence of RWA algorithm on their performance. The main results are resource dimensioning, the determination of working traffic load and the allowed failure rate and the selection of the best RWA algorithm for Kyatara research network in two possible phases of its implementation.



# SUMÁRIO

**RESUMO**

**ABSTRACT**

**LISTA DE FIGURAS**

**LISTA DE TABELAS**

**LISTA DE ABREVIATURAS**

**LISTA DE SÍMBOLOS**

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1.    Objetivos .....	7
1.2.    Metodologia .....	8
1.3.    Organização do Trabalho .....	8
<b>2. TÓPICOS SOBRE ROTEAMENTO ÓPTICO .....</b>	<b>10</b>
2.1.    Introdução.....	10
2.2.    Questões e Desafios sobre o Roteamento Óptico .....	11
2.2.1.  Restrições da Camada Física .....	13
2.2.2.  Restrições de Comprimento de Onda .....	15
2.2.3.  Descoberta de Topologias e Recursos .....	15
2.2.4.  Questões e Desafios no Provisionamento Automático .....	16
2.3.    O problema RWA.....	18
2.3.1.  Definição do Problema RWA.....	18
2.3.2.  Roteamento.....	19
2.3.3.  Designação de Comprimento de Onda (WA) .....	30
2.3.4.  Sinalização e Reserva de Recursos.....	34
2.3.5.  Políticas de Retenção.....	35
2.3.6.  Pesquisas sobre o Problema RWA .....	35
2.4.    Conclusão .....	37
<b>3. FUNDAMENTOS DO GMPLS .....</b>	<b>39</b>
3.1.    Introdução.....	39
3.2.    Roteamento GMPLS .....	41
3.3.    Estrutura de Roteamento com base no GMPLS .....	43
3.3.1.  Extensões para o GMPLS.....	45
3.4.    Cálculo de <i>Lightpath</i> - Questões e Desafios.....	46

3.5.	Arquiteturas Ópticas para o GMPLS.....	47
3.6.	Conclusão.....	50
<b>4.</b>	<b>DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>51</b>
4.1.	O Projeto Kyatera.....	52
4.2.	Descrição da Rede Kyatera .....	54
4.3.	Descrição do Simulador .....	56
4.3.1.	Algoritmos RWA utilizados no Simulador.....	58
4.3.2.	Definições.....	59
4.4.	Condições de Simulação .....	60
4.5.	Descrição do Problema.....	61
4.6.	Conclusão.....	63
<b>5.</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>64</b>
5.1.	Análise da Variação do Bloqueio de Conexões com a Carga Total de Tráfego.....	65
5.1.1.	Variação do bloqueio de conexões com o número de lambdas .....	65
5.1.2.	Análise do limite de carga total em relação ao número de lambdas .....	69
5.1.3.	Variação do Bloqueio com a Carga Total para diferentes Algoritmos RWA.....	72
5.2.	Simulação com base na Taxa de Elementos Não Confiáveis .....	76
5.2.1.	Variação do Bloqueio com a Taxa de Falha dos Elementos Não Confiáveis .....	77
5.2.2.	Variação do bloqueio com o número de elementos não confiáveis .....	79
5.2.3.	Variação do bloqueio com a taxa de falhas para diferentes Algoritmos RWA.....	82
5.3.	Conclusão.....	86
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>87</b>
6.1.	Análise dos resultados .....	87
6.2.	Análise do desempenho dos algoritmos RWA.....	89
6.3.	Análise da metodologia empregada.....	90
6.4.	Trabalhos Futuros.....	91
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>92</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - A evolução da estrutura das redes [1].	4
Figura 2.1 - Rede DWDM roteada por comprimento de onda.	10
Figura 2.2 - Roteador de Comprimento de Onda - OXC [26].	13
Figura 3.1 - Pilha de Protocolos do GMPLS [24].	41
Figura 3.2 - Blocos de construção do GMPLS para roteamento óptico [4].	45
Figura 3.3 - Arquiteturas Ópticas <i>Overlay</i> e <i>Peer-to-peer</i> para o GMPLS [1].	49
Figura 4.1 - Futura Rede KyaTera interconectando universidades do Estado de São Paulo.	53
Figura 4.2 - Rede KyaTera – Topologia I.	55
Figura 4.3 - Rede KyaTera - Topologia II.	56
Figura 5.1 - Variação do Bloqueio de conexões com a Carga Total na Topologia I conforme o aumento do número de lambdas.	67
Figura 5.2 - Variação do Bloqueio de conexões com a Carga Total na Topologia II conforme o aumento do número de lambdas.	67
Figura 5.3 - Variação do Bloqueio com a Carga Total na Topologia I entre 4 e 10 lambdas.	70
Figura 5.4 - Variação do Bloqueio com a Carga Total na Topologia II entre 4 e 10 lambdas.	70
Figura 5.5 - Variação do Bloqueio com a Carga Total para diferentes Algoritmos RWA na Topologia I - 4 lambdas - 1 Rota Alternativa.	73
Figura 5.6 - Variação do Bloqueio com a Carga Total para diferentes Algoritmos RWA na Topologia II - 4 lambdas - 1 Rota Alternativa.	73
Figura 5.7 - Variação do Bloqueio com a Carga Total para diferentes Algoritmos RWA na Topologia I - 4 lambdas - 3 Rotas Alternativas.	75
Figura 5.8 - Variação do Bloqueio com a Carga Total para diferentes Algoritmos RWA na Topologia II - 4 lambdas - 3 Rotas Alternativas.	75
Figura 5.9 - Variação da probabilidade de bloqueio para diferentes valores de prob. de falha dos elementos não confiáveis na Topologia I – 4 Lambdas.	78
Figura 5.10 - Variação da probabilidade de bloqueio para diferentes valores de prob. de falha dos elementos não confiáveis na Topologia II – 4 Lambdas.	78
Figura 5.11 - Variação da probabilidade de bloqueio com a taxa de elementos não confiáveis na Topologia I para diferentes valores de carga e de comprimento de onda.	80
Figura 5.12 - Variação da probabilidade de bloqueio com a taxa de elementos não confiáveis na Topologia II para diferentes valores de carga e de comprimento de onda.	80

Figura 5.13 - Variação da probabilidade de bloqueio com a taxa de elementos não confiáveis para 4 lambdas na topologia I, utilizando diferentes algoritmos RWA - (Carga = 15 Erlangs)..	83
Figura 5.14 - Variação da probabilidade de bloqueio com a taxa de elementos não confiáveis para 4 lambdas na topologia II, utilizando diferentes algoritmos RWA - (Carga = 72 Erlangs)..	83
Figura 5.15 - Variação do Bloqueio com o número de elementos não confiáveis para diferentes Algoritmos RWA na Topologia I - 4 lambdas - 3 Rotas Alternativas.....	85
Figura 5.16 - Variação do Bloqueio com o número de elementos não confiáveis para diferentes Algoritmos RWA na Topologia II - 4 lambdas - 3 Rotas Alternativas.....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tipos de Roteamento no Problema RWA [3].....	29
Tabela 2.2 – Tipos de Heurística para Designação de Comprimento de Onda [5].....	34
Tabela 3.1 - Suíte de Protocolos do GMPLS [24].....	40
Tabela 5.1 - Relação de Simulações Efetuadas para Dimensionamento da Rede KyaTera. ....	64
Tabela 5.2 - Comparação dos Valores Máximos de Carga para um limite de 5% de Bloqueio nas Topologias I e II. ....	71

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ADM</b>	Add/Drop Multiplexer
<b>ALT</b>	Alternate
<b>ASE</b>	Amplified Spontaneous Emission
<b>ASON</b>	Automatically Switched Optical Network
<b>ATM</b>	Asynchronous Transfer Mode
<b>AUR</b>	Adaptive Unconstrained Routing
<b>BGP</b>	Border Gateway Protocol
<b>CCAMP</b>	Common Control and Measurement Plane
<b>CR-LDP</b>	Constraint-based Routing Label Distribution Protocol
<b>DLE</b>	Dynamic Lightpath Establishment
<b>DWDM</b>	Dense Wavelength Division Multiplexing
<b>FA</b>	Forwarding Adjacency
<b>FAPESP</b>	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
<b>GMPLS</b>	Generalized Multiprotocol Label Switching
<b>IETF</b>	Internet Engineering Task Force
<b>IGP</b>	Interior Gateway Protocol
<b>ILP</b>	Integer Linear Program
<b>ION</b>	Intelligent Optical Network
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>IS-IS-TE</b>	Intermediate System-to-Intermediate System - Traffic Engineering
<b>ITU</b>	International Telecommunication Union
<b>LDP</b>	Label Distribution Protocol
<b>LLR</b>	Least-Loaded Routing
<b>LMP</b>	Link-Management Protocol
<b>LSA</b>	Link State Advertisement
<b>LSP</b>	Label-Switched Path
<b>LSR</b>	Label Switching Router
<b>MP<math>\lambda</math>S</b>	MultiProtocol Lambda Switching
<b>MPLS</b>	Multiprotocol Label Switching
<b>MRPR</b>	Minimum Reconfiguration Probability Routing

<b>NNI</b>	Network-Network Interface
<b>OSPF-TE</b>	Open Shortest Path First - Traffic Engineering
<b>OXC</b>	Optical Cross-Connect
<b>PMD</b>	Polarization Mode Dispersion
<b>PXC</b>	Photonic Cross-Connect
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>RSVP-TE</b>	Resource Reservation Protocol - Traffic Engineering
<b>RWA</b>	Routing and Wavelength Assignment
<b>SDH</b>	Synchronous Digital Hierarchy
<b>SLA</b>	Service Level Agreement
<b>SLE</b>	Static Lightpath Establishment
<b>SONET</b>	Synchronous Optical Network
<b>SPF</b>	Shortest Path First
<b>SRLG</b>	Shared Risk Link Group
<b>TCP</b>	Transmission Control Protocol
<b>TDM</b>	Time Division Multiplexing
<b>TE</b>	Traffic Engineering
<b>TIDIA</b>	Tecnologia da Informação no Desenvolvimento da Internet Avançada
<b>UNI</b>	User-Network Interface
<b>WA</b>	Wavelength Assignment
<b>WCC</b>	Wavelength Continuity Constraint
<b>WDM</b>	Wavelength Division Multiplexing
<b>WI</b>	Wavelength Interchangeable
<b>WS</b>	Wavelength Selective

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\lambda$  - Comprimento de onda
- $\mu$  - Inverso do Tempo Médio de retenção da conexão
- $\lambda_T$  - Carga total de tráfego oferecida à rede
- $\lambda_r$  - Taxa de requisição de conexões
- $\lambda_f$  - Taxa de falha de roteadores e enlaces



## 1. INTRODUÇÃO

As redes de transmissão surgiram inicialmente para atender ao serviço de voz que se desenvolveu rapidamente como uma primeira necessidade de comunicação.

As redes de dados e vídeo surgiram em seguida de forma independente, atendendo aos novos serviços, aos anseios da sociedade e do mundo dos negócios, gerando outras soluções.

As redes de transporte com base no SONET/SDH (*Synchronous Optical Network/Synchronous Digital Hierarchy*) têm permitido um nível garantido de desempenho e de confiabilidade para os serviços de voz e linhas alugadas desde 1984 [1].

Atualmente, a necessidade de integração destas redes é evidente, principalmente após a explosão mundial da Internet a partir de 1995 e da criação dos novos serviços que integram estas mídias [1].

As redes ópticas logo se apresentaram como solução para esta necessidade de integração da informação no meio físico, proporcionando velocidade, confiabilidade e alcances nunca antes imaginados. Elas surgiram primeiramente centradas nos serviços de voz proporcionados pela rede telefônica, mas estão evoluindo para serem redes dinâmicas<sup>1</sup> e de multi-serviço<sup>2</sup> centradas em IP [2].

Atualmente, o tráfego de dados já supera o de voz e tende a crescer cada vez mais graças aos novos serviços e a crescente utilização da Internet [1].

Diante deste novo cenário, as redes passaram a utilizar, em sua maioria, quatro camadas [1, 2]. São elas:

- a) **IP (*Internet Protocol*)**: para transporte de informações e serviços;
- b) **ATM (*Asynchronous Transfer Mode*)**: para multiplexação estatística, permitindo ao mesmo tempo integração multi-serviço com engenharia de tráfego;
- c) **SONET/SDH**: para alocar banda propriamente, oferecendo mecanismos para utilização eficiente da largura de banda e mecanismos de proteção inteligentes;
- d) **DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*)**: para prover largura de banda, melhorando a utilização dos recursos ópticos (fibras).

---

<sup>1</sup> Redes onde as conexões são estabelecidas e liberadas dinamicamente.

<sup>2</sup> Redes capazes de prestar serviços de Voz, Vídeo e Dados simultaneamente.

Porém, esta arquitetura multicamada sofre um efeito “gargalo”, ou seja, qualquer camada pode limitar a escalabilidade da rede toda, além de se constituir como uma solução cara<sup>3</sup>. Embora o ATM tenha vantagens para prover integração multi-serviço e funcionalidade de QoS, ele é muito ineficiente em transporte massivo de dados por causa de seu imenso *overhead*, fora seu custo, muitas vezes proibitivo<sup>4</sup>.

Seguindo a necessidade de diminuir cada vez mais os custos das redes e do bit transmitido, há uma tendência de criar novas estruturas para prover os serviços a preços mais competitivos. O fato de ter que prover mais tráfego e a um custo menor exige que novas soluções sejam encontradas para tornar as redes mais eficientes. Alcançar isso dentro das arquiteturas de redes atuais é um grande desafio [2].

Um transporte mais eficiente deve otimizar os custos da multiplexação e da comutação de dados para um grande volume de tráfego.

O DWDM<sup>5</sup> mostra-se como uma das técnicas eficientes para tirar maior proveito das infra-estruturas de fibra já existentes, reduzindo enormemente o custo do bit transmitido por cabo [3].

Taxas da ordem de Terabits/seg. são hoje possíveis graças a esta técnica, que cria múltiplas fibras virtuais dentro de uma única fibra física.

A utilização de comprimentos de onda como elementos básicos de transmissão criou a necessidade de permitir também a sua comutação, fazendo surgir equipamentos como os OXCs (*Optical Cross-connects*) que permitem a comutação de comprimentos de onda sem conversão eletrônica do sinal [4].

Nota-se, portanto, que no plano físico já despontam soluções de alta velocidade [5-9], as quais aproveitam melhor a infra-estrutura e permitem comutações de grande volume de dados.

Por outro lado, em termos de técnicas de roteamento, é esperada e já é notada, a grande predominância de redes baseadas em IP [4]. Porém, para utilizar o IP sobre os novos dispositivos ópticos que estão surgindo são necessárias técnicas que aumentem a velocidade de encaminhamento dos pacotes e utilizem a camada física, a qual provê banda larga, de forma eficiente, controlando os recursos e provendo engenharia de tráfego [2].

---

<sup>3</sup> Cada camada exige equipamento e sistema de gerência próprios.

<sup>4</sup> Um cartão ATM com interface STM-1 chega a custar US\$ 35.200,00 segundo <http://shopper.cnet.com>.

<sup>5</sup> A tecnologia DWDM permite que vários canais ópticos sejam transmitidos na mesma fibra, diferenciados pelo seu  $\lambda$ .

Historicamente, o IP mostrou-se flexível e simples para o roteamento de pacotes, tornando-se popular para as redes de dados. Melhorias foram alcançadas na arquitetura de roteamento IP com o advento da tecnologia MPLS (*Multiprotocol Label Switching*).

A premissa do MPLS é aumentar a velocidade de encaminhamento de pacotes e prover engenharia de tráfego em redes que utilizam o protocolo IP [1]. Para cumprir isso, o MPLS transforma a rede baseada em IP, que é não orientada a conexão, em uma rede orientada a conexão, onde a via entre fonte e destino é pré-calculada baseada no seu uso específico.

Com a finalidade de aumentar a velocidade de encaminhamento, um dispositivo MPLS utiliza *labels* (rótulos), ao invés do cabeçalho IP, para determinar o próximo *hop* para um pacote recebido.

Para prover engenharia de tráfego, são utilizadas tabelas que representam os níveis de QoS que a rede pode suportar. As tabelas e os *labels* são utilizados juntos para estabelecer a via fim-a-fim chamada de LSP (*Label-Switched Path*).

Protocolos de roteamento tradicionais, como o OSPF (*Open Shortest Path First*) e IS-IS (*Intermediate System-to-Intermediate System*) e protocolos de sinalização estendidos, como o CR-LDP (*Constraint-based Routing Label Distribution Protocol*) e o RSVP-TE (*Resource Reservation Protocol*), constituem a suíte de protocolos que possibilitam o MPLS [1].

O rápido crescimento das capacidades dos roteadores e dos OXCs sugere a possibilidade do IP atuar diretamente sobre o WDM, eliminando-se as camadas ATM e SONET/SDH, o que resulta numa rede mais simples, mais barata, com alta escalabilidade e elevadíssimas taxas de transmissão e de comutação.

Esta arquitetura mais atual é algumas vezes referenciada como IP-sobre-DWDM [1, 4]. Porém, se o IP original fosse transmitido diretamente sobre o DWDM, não haveria como prover engenharia de tráfego e seria necessária uma funcionalidade adicional na camada óptica, principalmente para prover qualidade de serviço (QoS) [6].

O MPLS também não pode ser utilizado para controlar redes ópticas flexíveis. Para prover a interconexão entre uma camada IP/MPLS e a camada fotônica, é necessário um plano de controle unificado, que aparece hoje como o grande desafio para utilização e implementação desta solução. A atual rede SDH também não pode ser controlada e gerenciada pelo MPLS.

Para permitir esta integração entre o IP e a camada óptica, surgiu, então, o GMPLS (*Generalized Multiprotocol Label Switching*) que propõe novos elementos, transformando as redes ópticas em redes inteligentes e provendo um plano de controle<sup>6</sup> único [1-6].

Este plano de controle comum foi derivado do MPLS e visa a simplificação da operação e do gerenciamento da rede, automatizando o provisionamento fim-a-fim das conexões, gerenciando os recursos e provendo o nível de QoS esperado em aplicações novas e sofisticadas. O GMPLS mostra-se, então, como o ponto de convergência dos desenvolvimentos do IP/MPLS e da tecnologia óptica capaz de prover uma nova estrutura de rede inteligente [2].

A tendência da migração para uma nova estrutura é ilustrada na figura 1.1, que mostra como as camadas estão sendo integradas para simplificar o serviço de encaminhamento da informação.

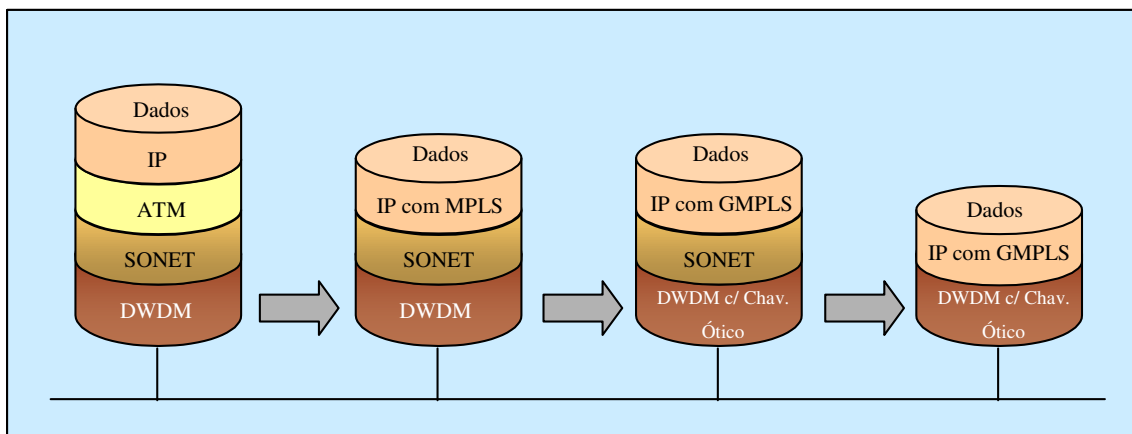


Figura 1.1 - A evolução da estrutura das redes [1].

O GMPLS (que foi referenciado inicialmente como MPλS<sup>7</sup>) estende o MPLS para prover este plano de controle único (sinalização e roteamento) para todas as camadas, protocolos e tecnologias de transporte como IP, SDH e DWDM e para dispositivos que comutam em qualquer dos seguintes domínios: pacote, tempo, comprimento de onda e fibra, generalizando o rótulo [1-2].

<sup>6</sup> Roteamento e sinalização.

<sup>7</sup> O MPλS visava o controle e roteamento apenas de lambdas, não incluindo a rede IP e SDH.

O GMPLS tem tido um forte suporte da indústria [10]. Ele está sendo desenvolvido e mantido principalmente pelo IETF (*Internet Engineering Task Force*), mas tem aumentado sua aceitação em outras organizações como ITU (*International Telecommunication Union*) e Comitê T1 (*Committee T1 - Alliance for Telecommunications Industry Solutions*). Alguns documentos que padronizam o GMPLS podem ser encontrados nas referências [11-20].

O GMPLS tem sido visto também como provável padrão para o plano de controle do ASON (*Automatically Switched Optical Network*), que contém os modelos funcional e de arquitetura propostos pelo ITU-T para as novas redes ópticas inteligentes [10].

A tecnologia GMPLS prevê o roteamento dinâmico de comprimentos de onda sobre uma rede totalmente óptica, para estabelecimento e liberação de vias fim-a-fim pelo plano de controle [4].

Neste novo cenário, os dispositivos de rede devem concentrar cada vez mais tráfego e as redes passam a ter roteamento dinâmico. Desse modo, a determinação da rota e do comprimento de onda entre origem e destino numa rede totalmente óptica constitui-se num problema complexo chamado problema RWA (*Routing and Wavelength Assignment*) [3-9]. Surge, então, um novo conceito para as redes, chamado de roteamento óptico.

Algoritmos para solução do problema RWA (chamados na literatura de algoritmos RWA) têm sido propostos [3-4, 21-31] de modo a garantir o estabelecimento de rotas e a designação do comprimento de onda para vias fim-a-fim (*lightpaths*) dentro de uma rede totalmente óptica controlada pelo plano de controle do GMPLS.

Dentre os muitos aspectos do GMPLS, destaca-se, neste trabalho, o dimensionamento de uma rede totalmente óptica, provendo o roteamento de lambdas com tráfego dinâmico, através de algoritmos RWA.

Neste cenário, quando se tenta estabelecer uma via óptica, é necessário definir uma rota e selecionar um comprimento de onda fim-a-fim para cada requisição de conexão que chega em um nó.

Conversores de comprimento de onda podem ser utilizados nos nós, facilitando a seleção de lambda em cada trecho da rota. Se não utilizados, o mesmo comprimento de onda deve estar disponível fim-a-fim. Caso não haja comprimento de onda disponível, haverá o bloqueio da conexão e a requisição será negada degradando o desempenho da rede.

Diminuir ao máximo o bloqueio de requisições de conexões é o critério adotado para dimensionamento de uma rede óptica dinâmica.

Pesquisas mostram que a topologia da rede, a utilização de conversores ópticos e a utilização de algoritmos adequados para o problema RWA constituem a base para melhorar o desempenho de uma rede totalmente óptica [6].

A implementação de algoritmos RWA que permitam determinar rotas numa rede óptica inteligente, otimizando os recursos e minimizando a probabilidade de bloqueio de requisições de *lightpaths*, torna-se fundamental nesta nova concepção [3, 20, 31].

Entre os muitos fatores que podem ser considerados na determinação de uma rota óptica na rede GMPLS são destacados aqui as estatísticas de falha nos nós e nos enlaces, que podem afetar o desempenho dos algoritmos RWA e conseqüentemente da rede como um todo.

Conforme a confiabilidade da rede, o bloqueio de conexões pode variar, sendo possível, inclusive, a determinação de rotas com menor probabilidade de reconfiguração, o que permite oferecer um serviço mais estável [22].

Os elementos de rede podem ser classificados como confiáveis ou não conforme sua probabilidade de falha [22], estando normalmente distribuídos das mais diversas formas.

Este trabalho exemplifica como a análise do bloqueio de requisições e de estatísticas de falha numa rede GMPLS dinâmica pode ser utilizada para auxiliar no seu dimensionamento.

Através de simulações, o presente trabalho procura demonstrar que é possível determinar o número mínimo de comprimentos de onda a ser utilizado numa rede GMPLS, considerando-se o aumento da carga de tráfego dinâmico, um limite de bloqueio de conexões e o número de elementos não confiáveis presentes. A relação entre estes fatores também é investigada para verificação do comportamento da rede e a determinação de seu ponto de trabalho conforme a topologia e o número de recursos disponíveis. É analisada ainda a influência do tipo de algoritmo RWA selecionado sobre o desempenho da rede e a economia de recursos.

As simulações com diferentes algoritmos RWA foram realizadas com base na rede GMPLS KyaTera<sup>8</sup> - *testbed* óptico que está sendo implementado entre universidades do Estado de São Paulo e na sua possível expansão.

A pesquisa visa a obtenção de resultados práticos para auxiliar no dimensionamento e na expansão do número de lambdas a serem utilizados nesta rede, permitindo identificar seus limites de carga e de bloqueio para um ponto ótimo de trabalho.

## 1.1. Objetivos

Com base no que foi exposto os principais objetivos deste trabalho são:

- a) Demonstrar como simulações com algoritmos RWA podem ser utilizadas no dimensionamento de uma rede totalmente óptica;
- b) Dimensionar o número mínimo de lambdas numa rede GMPLS conforme a variação da carga de tráfego dinâmico e do número de elementos não confiáveis;
- c) Determinar a carga suportada por determinada topologia, mensurando o ganho obtido com o acréscimo de interconexões e de lambdas;
- d) Investigar como a taxa de falhas em enlaces e roteadores limita o desempenho da rede e afeta seu dimensionamento;
- e) Verificar se a utilização de diferentes algoritmos RWA permite economizar recursos da rede;
- f) Verificar o comportamento de uma rede totalmente óptica quando se altera a topologia e o número de recursos disponíveis;
- g) Obter resultados práticos que auxiliem o dimensionamento e a expansão do número de lambdas, permitindo identificar os limites de carga e de bloqueio da rede para um ponto ótimo de trabalho.

---

<sup>8</sup> Detalhes sobre a rede KyaTera podem ser encontrados em <http://www.kyatera.fapesp.br>.

## 1.2. Metodologia

Para realização deste trabalho, a seguinte metodologia foi utilizada:

- a) Foram efetuadas simulações com algoritmos RWA utilizando-se como referência a rede GMPLS experimental KyaTera;
- b) Foi realizada a comparação de duas topologias quanto ao bloqueio de conexões e à economia de recursos;
- c) Diferentes algoritmos RWA foram comparados para verificar sua influência quanto ao desempenho e utilização de recursos;
- d) Foi verificado o bloqueio de conexões em relação à carga total da rede e à taxa de falhas de enlaces e roteadores;
- e) Adotou-se um limite de bloqueio de 5%, que serviu como referência para comparação do desempenho da rede em cada topologia.

## 1.3. Organização do Trabalho

Para atingir os objetivos propostos, este trabalho foi dividido em seis capítulos que visam conduzir o leitor ao entendimento dos resultados obtidos, como mostrado a seguir:

- O capítulo 2 trata do roteamento óptico, mostrando brevemente todos os elementos, questões e desafios contidos numa rede totalmente óptica. É também definido e explicado o problema RWA, relacionando-se os tipos de algoritmos existentes, suas características e diferenças. O objetivo deste capítulo é fornecer subsídios ao leitor para que seja possível entender os problemas de uma rede totalmente óptica, os tipos de algoritmos RWA que foram utilizados no simulador adotado e os resultados da comparação de desempenho que foi realizada entre eles.

- No capítulo 3 são apresentadas as principais características de uma rede GMPLS e sua relação com os algoritmos RWA e o roteamento óptico. Aqui os objetivos são relacionar as informações mais importantes para entendimento da rede GMPLS KyaTera, que foi utilizada como base de estudo neste trabalho, e compreender a relação existente entre o GMPLS e os algoritmos RWA.



- No capítulo 4 são descritos o projeto e a rede KyaTera, os tipos de topologia que foram investigados e os problemas de dimensionamento a serem resolvidos neste trabalho. São também apresentadas as características do simulador que foi utilizado para análise da rede. O objetivo deste capítulo é descrever o problema a ser tratado, o cenário sobre o qual é realizada a pesquisa e a metodologia proposta para obtenção do número mínimo de comprimentos de onda em relação ao bloqueio de conexões e à taxa de falhas na rede, comparando-se topologias e algoritmos RWA.

- No capítulo 5 são apresentados e analisados os resultados das simulações, verificando-se a variação do bloqueio com o aumento da carga total de tráfego dinâmico, do número de elementos não confiáveis na rede, e com a seleção de diferentes tipos de algoritmos RWA. O objetivo é obter dados claros que permitam dimensionar de forma prática o número mínimo de comprimentos de onda a ser utilizado na rede KyaTera para cada tipo de topologia e determinado limite de bloqueio. As simulações também pretendem verificar os limites de carga de tráfego dinâmico e sua relação com a existência de elementos não confiáveis na rede para um bloqueio máximo de conexões de 5%. É realizada ainda uma comparação entre diferentes algoritmos RWA nas duas topologias, verificando-se como os mesmos podem afetar o dimensionamento e o desempenho da rede KyaTera.

- Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho baseadas nos resultados obtidos nas simulações. São também apresentadas algumas propostas para trabalhos futuros, visto que nem todos os fatores que afetam uma rede totalmente óptica foram considerados neste dimensionamento.

## 2. TÓPICOS SOBRE ROTEAMENTO ÓPTICO

### 2.1. Introdução

Nos últimos anos, o WDM tornou-se a principal tecnologia de transmissão em redes ópticas.

Usando o WDM, múltiplos canais, diferenciados pelos seus comprimentos de onda, podem ser transmitidos em uma única fibra óptica e cada um pode operar em sua taxa de transmissão máxima. Uma rota, uma sequência de enlaces ópticos entre um par de nós fonte – destino, forma uma via totalmente óptica, utilizando um determinado comprimento de onda em cada trecho. Tal rota é definida como uma via óptica (*lightpath*) [5].

Cada comprimento de onda, de cada fibra de um enlace, é um canal, o qual, por sua vez, é completamente independente de outros comprimentos de onda da mesma fibra. Isso faz com que a camada óptica torne-se conhecedora das conexões por identificá-las pelos seus comprimentos de onda. Esta estrutura, adicionada de um plano de controle, tem sido definida como uma ION - *Intelligent Optical Network* [3]. Uma topologia típica de uma rede DWDM com seus diferentes canais associados, designados por diferentes comprimentos de onda, é mostrada na figura 2.1.

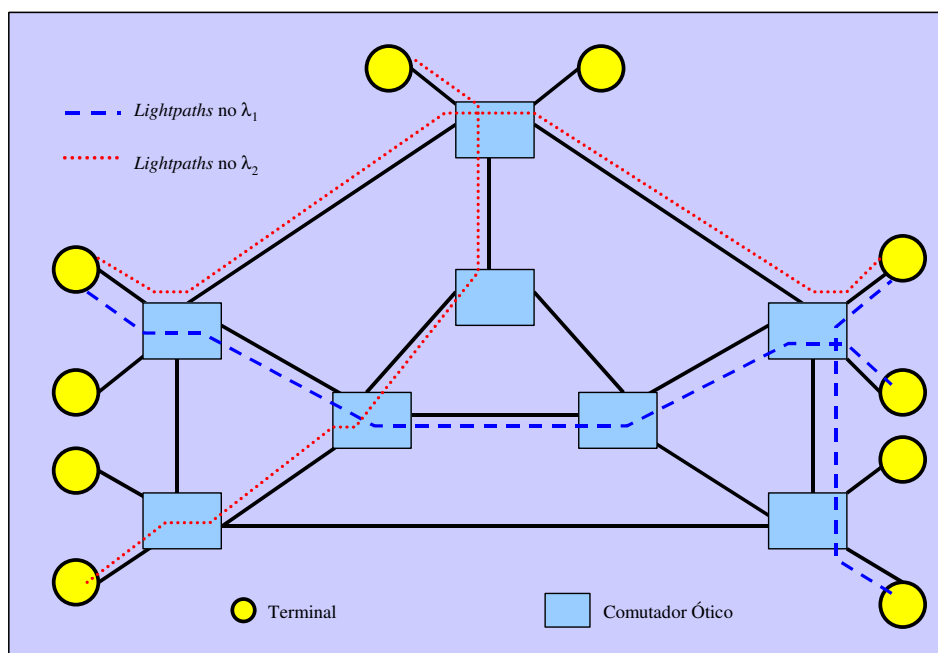


Figura 2.1 - Rede DWDM roteada por comprimento de onda.

O roteamento numa rede totalmente óptica traz novas questões e desafios a serem resolvidos para prover os novos serviços de um modo dinâmico. O aumento da complexidade das redes ópticas dificulta a tarefa de interconexão. Em particular, o roteamento de *lightpath* para estabelecimento do canal é um dos fatores que mais afetam o projeto das redes ópticas futuras e sua operação [4].

Particularmente, um aspecto chave da ION é sua capacidade de estabelecer e gerenciar canais fim-a-fim entre dois nós. Este assunto complexo tem sido referenciado em redes WDM como problema RWA. O problema RWA é realmente um dos maiores e mais complexos problemas para os pesquisadores em uma ION e sua solução é crucial para atender ao desempenho e qualidade dos novos serviços [7].

Até o momento, não há nenhum método prático e eficiente de roteamento e designação de comprimentos de onda, que tenha sido definido como padrão para encontrar um *lightpath* em redes DWDM com multi-comprimentos de onda [3].

Os próximos itens tratam dos aspectos do roteamento óptico, incluindo suas questões, desafios e um estudo dos algoritmos RWA. Este estudo visa ao entendimento e à diferenciação dos tipos de algoritmos utilizados no simulador adotado neste trabalho.

## 2.2. Questões e Desafios sobre o Roteamento Óptico

Já é consenso que as redes ópticas constituem-se como a grande solução para prover a banda necessária aos novos serviços e ao crescimento constante do tráfego na Internet.

Nas novas redes ópticas que estão sendo propostas, o objetivo principal é suportar os rápidos estabelecimento e restauração de *lightpaths*. As redes ópticas passam a ser inteligentes, permitindo estabelecer, agrupar e liberar vias fim-a-fim, rotear comprimentos de onda e restaurar *lightpaths*, o que as tornam bem mais complexas e com restrições até agora inexistentes [4].

Permitir o controle e o gerenciamento de todas estas funcionalidades em um ambiente com tráfego dinâmico é um dos grandes desafios para as redes ópticas de nova geração.

De modo geral, as redes ópticas podem ser classificadas em opacas e totalmente ópticas (ou transparentes).

Em redes opacas, cada *lightpath* sofre conversão elétrica na regeneração do sinal óptico em cada nó intermediário por onde passa. A maior desvantagem de tais redes é o alto custo destas conversões nos nós intermediários. Além disso, as redes opacas são dependentes de formato, protocolo e taxa de bit, exigindo regeneradores específicos para cada tipo de sinal, sendo que qualquer expectativa de transparência destes atributos é perdida. No entanto, uma vantagem das redes opacas é que elas previnem o acúmulo de problemas ópticos ao longo da via (como a dispersão cromática, atenuação, etc.), além de permitirem a conversão de comprimentos de onda e a monitoração detalhada de desempenho.

Já nas redes totalmente ópticas, não há nenhuma regeneração eletrônica do sinal ou conversão óptico-eletrônica para uma via óptica estabelecida fim-a-fim.

Redes totalmente ópticas podem suportar diferentes taxas de bits, protocolos e formatos de sinal. Como não há nenhuma conversão óptico-eletrônica, o tempo total de transmissão é reduzido. Por estes motivos, as redes totalmente ópticas são tidas como as redes do futuro, provendo as necessidades para os novos serviços.

As redes totalmente ópticas carecem de monitoração de desempenho e possuem limitações de distância, devido à atenuação e dispersão, problemas estes que devem ser resolvidos para obter o melhor desempenho possível em cada rota designada.

Um meio termo entre redes opacas e redes totalmente ópticas são as redes ópticas translúcidas, onde regeneradores são utilizados apenas em certos pontos da rede e para *lightpaths* com comprimento que excedam um determinado limite [26].

Para redes totalmente ópticas são necessários novos elementos, como, por exemplo, os OXCs que permitem comutar comprimentos de onda ou mesmo convertê-los sem qualquer tratamento óptico-eletrônico. A figura 2.2 mostra um exemplo de estrutura de OXC com três portas ópticas de entrada e três de saída para roteamento de quatro comprimentos de onda. Estes elementos funcionam como roteadores ópticos e necessitam de um protocolo de controle para comutação ou reroteamento.

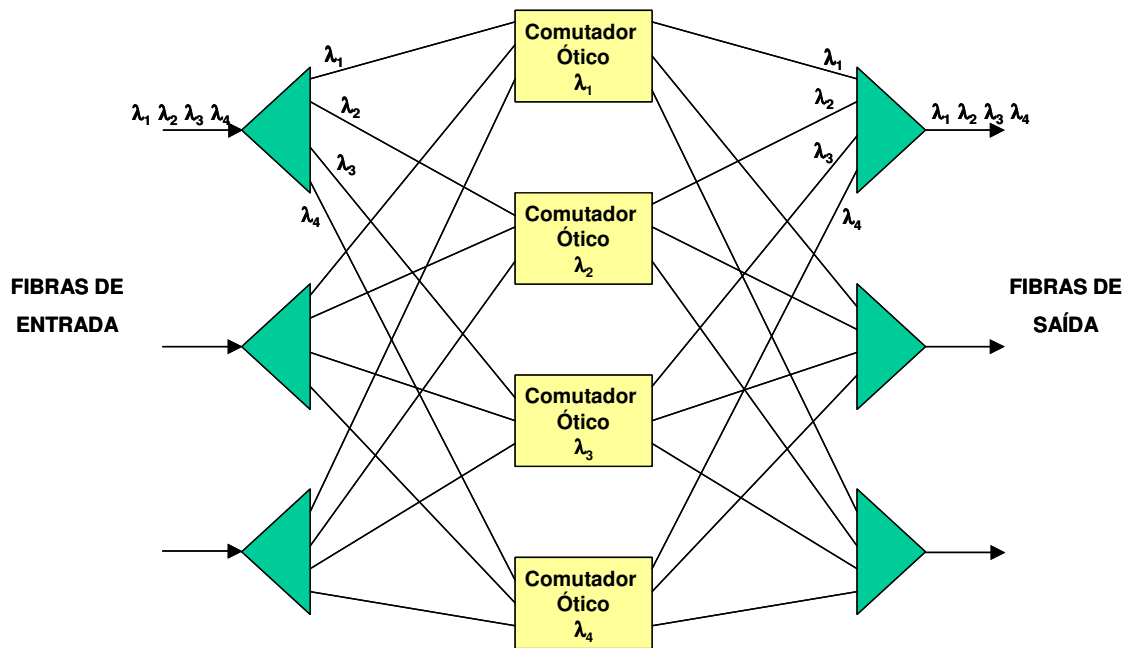


Figura 2.2 - Roteador de Comprimento de Onda - OXC [26].

As redes totalmente ópticas necessitam de protocolos especiais (roteamento e sinalização), pois tratam separadamente os planos de controle e de dados.

Protocolos de roteamento em redes totalmente ópticas são usados para atualizar a topologia da rede e o status de informação dos recursos, mas não são envolvidos no encaminhamento de dados [6] como ocorre na rede IP, onde tais informações são extraídas do cabeçalho do pacote. Por este motivo, as imprecisões de status sobre os recursos e a topologia poderão ter efeito no estabelecimento de uma nova conexão, mas não causarão a desconexão de uma já existente [3].

### 2.2.1. Restrições da Camada Física

Redes totalmente ópticas apresentam vários problemas relativos à transmissão analógica e, portanto, necessitam de provisionamento especial com respeito ao anúncio e atualização das informações de estado [4].

Em particular, restrições do meio físico precisam ser levadas em conta na seleção de uma via óptica [33]. As principais restrições são:

- **Atenuação:** conforme o sinal de luz caminha pela fibra óptica, ele perde potência, dependendo das características da mesma e do comprimento de

onda utilizado. Há, portanto, um limite máximo de distância para que o sinal óptico ainda possa ser detectado na recepção (*power budget*);

- **Dispersão cromática:** a fonte de luz de um sistema óptico possui um espectro de frequência, sendo formado por diferentes comprimentos de onda que caminham na fibra com velocidades diferentes chegando em tempos diferentes no receptor. Isso causa alargamento temporal no pulso, acarretando interferência intersimbólica;
- **Dispersão do modo de polarização (PMD - *Polarization Mode Dispersion*):** alargamento temporal do sinal óptico devido à ligeira diferença entre as velocidades de propagação das duas polarizações ortogonais que constituem o sinal propagante na fibra;
- **Emissão espontânea dos amplificadores ópticos (ASE - *Amplified Spontaneous Emission*):** no processo amplificação do sinal óptico ocorre emissão espontânea nos amplificadores (principalmente quando utiliza fibra dopada com Érbio). Se o sinal passa por vários amplificadores, este ruído se acumula e é amplificado podendo degradar o sinal, diminuindo a relação sinal/ruído;
- **Interferência entre canais (*cross-talk*):** quando vários sinais com diferentes comprimentos de onda são transmitidos numa mesma fibra óptica, principalmente com alta potência, pode ocorrer interferência entre eles devido às não linearidades da fibra, por exemplo, degradando a qualidade do sinal.

Mais detalhes sobre as limitações e problemas da transmissão óptica podem ser encontradas na referência [33].

Nos trabalhos atuais sobre roteamento óptico (inclusive neste), supõe-se que todas as rotas possuem qualidade de sinal adequada e, portanto, algumas destas restrições ópticas não são consideradas, embora isso possa constituir um grave problema [5].

Cada tipo de restrição possui seu potencial para limitar rotas, devendo ser considerada no projeto das redes totalmente ópticas e incluída nos anúncios do protocolo de roteamento, além de ser levada em conta nos algoritmos de roteamento e no cálculo de uma rota. O tipo exato de informação da camada física a ser incluída necessita de estudo futuro e pode depender também dos limites geográficos da rede [4].

### 2.2.2. Restrições de Comprimento de Onda

Em redes totalmente ópticas, a continuidade do comprimento de onda (manter o mesmo comprimento de onda em todos os enlaces na rota) deve ser preservada num *lightpath* fim-a-fim, a menos que sejam empregados conversores de comprimento de onda. Isso é conhecido como Restrição de Continuidade de Comprimento de Onda (WCC – *Wavelength Continuity Constraint*) [5, 23]. Neste caso, um único comprimento de onda deve estar disponível em todos os enlaces na via selecionada. Isso significa que os anúncios de rota devem conter informações sobre a disponibilidade de comprimento de onda em cada enlace de fibra da ION. Um tal nível de detalhamento pode introduzir problemas de escalabilidade nos algoritmos de roteamento, devido ao grande número de informações a serem tratadas nos nós e ao tempo de convergência dos protocolos.

Algumas soluções que fornecem a disponibilidade de comprimento de onda num enlace de fibra têm sido discutidas (por exemplo, a extensão de protocolos como o OSPF e IS-IS). Infelizmente, estes métodos implicam em importantes mudanças nos protocolos de roteamento já existentes [3].

### 2.2.3. Descoberta de Topologias e Recursos

O método usual para estabelecer um *lightpath* possui duas partes [4]. A primeira é a fase de descoberta de recursos/topologia que visa a introdução dos atributos da rede óptica e a formulação das restrições para o cálculo de *lightpath*. A segunda é o estabelecimento propriamente dito, no qual a rota é calculada e os comprimentos de onda são designados para a via.

A primeira fase compreende o procedimento através do qual a topologia e os recursos de todos os enlaces de uma rede são determinados. Isso consiste especificamente de três processos: descoberta de vizinhos, supervisão da viabilidade do enlace e distribuição/roteamento [4].

O conhecimento da topologia, dos recursos existentes na rede e a atualização destas informações são fundamentais para que sejam estabelecidas vias fim-a-fim, reduzindo-se a probabilidade de bloqueio de requisições.

Já o cálculo da via requer informação topológica sobre a rede, bem como informações relevantes sobre os recursos de cada elemento da mesma (como lambdas e

portas disponíveis). Para isso, protocolos do tipo *link state* são usados para distribuir a topologia e outros atributos da rede. Há atualmente várias RFCs [15, 16, 17] que especificam como protocolos *link state* deverão distribuir as informações adicionais necessárias para o cálculo de *lightpaths* com restrição.

Todos estes processos constituem novos desafios e padrões a serem especificados para o roteamento óptico.

#### 2.2.4. Questões e Desafios no Provisionamento Automático

O provisionamento de novos serviços nas redes de transporte atuais envolve atividades tais como a adição de novos dispositivos de acesso e ADMs, mapeamento de novas vias, verificação da conectividade do enlace, definição de SLA (*Service Level Agreement*), etc. Estes processos são totalmente manuais e geralmente levam várias semanas (ou meses) para serem executados.

Através do emprego de planos de controle ópticos distribuídos, todos estes processos (ou parte deles) poderão ser implementados automaticamente, resultando em um provisionamento mais rápido, na diminuição dos custos de operação e na melhoria no gerenciamento de recursos da rede [5].

Entretanto, algumas características e requisitos são críticos e únicos para a implementação do provisionamento automático em redes totalmente ópticas e podem causar sérios problemas se não forem adequadamente endereçados. Os principais são [5]:

- **Restrições das redes ópticas WDM:** além dos problemas da camada óptica já citados, a transmissão de vários comprimentos de onda com alta potência na mesma fibra, pode sofrer de problemas de interferência, conforme o tipo de fibra óptica utilizada. Além disso, é necessário manter o mesmo comprimento de onda na via fim-a-fim.
- **Necessidade de conversores de comprimento de onda e sua localização:** para facilitar o estabelecimento dos caminhos ópticos podem ser utilizados conversores de comprimento de onda em alguns nós. A localização destes conversores precisa ser divulgada e controlada na rede para estabelecimentos das vias ópticas.



- **Escalabilidade de roteamento:** o roteamento óptico numa rede WDM exige que sejam consideradas novas restrições (como o WCC) e novos parâmetros que incluam os recursos de todos os nós. A quantidade de mensagens e parâmetros a serem processados nos nós e a precisão da informação contida na tabela de roteamento podem se tornar um ponto crítico para o rápido estabelecimento das vias ópticas.
- **Necessidade de agrupamento de enlaces:** para diminuir as tabelas de roteamento, economizar recursos e facilitar a designação de vias, pode-se agrupar comprimentos de onda, trabalhando-se com banda de onda, que representa um grupo de lambdas que podem ser roteados juntos;
- **Necessidade de gerenciamento dos enlaces ópticos:** numa rede totalmente óptica, informações de gerenciamento não fazem parte do sinal e não são extraídos do mesmo nos nós, sendo necessário controlar os OXCs de forma independente e precisa;
- **Localização de falhas:** é necessário algum protocolo que gerencie os enlaces puramente ópticos e anuncie a ocorrência de falhas nos mesmos. Diferente das redes IP que utilizam mensagens *hello*, as redes puramente ópticas necessitam de outras soluções;
- **Mecanismos para estabelecimento de *lightpaths* bidirecionais:** como numa rede WDM a transmissão é na sua maioria bidirecional, é necessário um mecanismo para estabelecer as vias e reservar os recursos nos dois sentidos;
- **Roteamento óptico e sinalização intra e interdomínio:** a rede deve ser dividida em domínios para facilitar o roteamento e a convergência dos protocolos, além de facilitar o controle. Portanto, são necessárias soluções tanto intradomínio como interdomínio para estabelecimento das rotas ópticas.

No futuro, deseja-se estabelecer um *lightpath* fim-a-fim dentro de uma rede óptica de forma automática, provendo-se mecanismos de proteção/recuperação e de controle do mesmo para auto-regeneração. Além disso, o *lightpath* deve ser liberado também de forma automática após o término do serviço, ficando livre para outras requisições da

rede. Portanto, tudo isso deve ocorrer dentro de um ambiente com tráfego dinâmico, o que exige um controle constante e preciso da rede [4, 5].

Para atender a estas exigências, deve-se prover os elementos de rede com protocolos e algoritmos inteligentes que além de cumprir estas funcionalidades, ainda consigam garantir a atualização das informações sobre os recursos e as ocorrências da rede. Um plano de controle como o GMPLS, explicado no próximo capítulo, poderá prover estas necessidades.

## 2.3. O problema RWA

### 2.3.1. Definição do Problema RWA

Dado um conjunto de requisições de conexão numa rede totalmente óptica, roteada por comprimento de onda, a questão de como estabelecer *lightpaths* para as mesmas é chamado de problema RWA.

Para resolver o problema são propostos algoritmos chamados de algoritmos RWA. Basicamente, o objetivo de um algoritmo RWA é estabelecer rotas (***Routing***) e designar comprimentos de onda (***Wavelength Assignment***) para cada requisição de conexão de forma automática.

Portanto, o problema RWA envolve duas partes que podem ser resolvidas separadamente, para simplificar a solução, ou simultaneamente [5]. Há propostas de solução para os dois casos.

Tipicamente, há dois tipos de tráfego possíveis numa rede óptica roteada por comprimento de onda: estático e dinâmico. De modo correspondente, há dois tipos de estabelecimento de *lightpath* a serem tratados no problema RWA:

- **Estabelecimento Estático de *Lightpath* (SLE - *Static Lightpath Establishment*).**

Neste caso, todas as requisições de conexão são conhecidas antecipadamente pelo nó e não há alteração, isto é, uma requisição para o estabelecimento de vias ópticas é fornecida inicialmente e as mesmas não são liberadas após o término do serviço. Para o SLE, o critério para determinação do melhor algoritmo RWA é a minimização do

número de comprimentos de onda para uma dada topologia de rede, do número de fibras e do conjunto de vias ópticas demandadas [8].

- **Estabelecimento Dinâmico de *Lightpath* (DLE - *Dynamic Lightpath Establishment*).**

Neste caso, todas as requisições de conexão chegam dinamicamente ao nó e as conexões são liberadas após o término do serviço. Pode não ser possível o estabelecimento da conexão devido à falta de recursos e neste caso ocorrerá o bloqueio da mesma, causando sua rejeição. Aqui, o critério para determinação do melhor algoritmo RWA é a minimização da probabilidade de bloqueio de requisições para um dado número de comprimentos de onda e/ou a minimização do custo de rede.

O problema de estabelecimento estático de um *lightpath* é mais fácil de resolver com a atual tecnologia e seria uma solução de curto prazo para uma rede totalmente óptica [8]. Porém, a tendência é a utilização do estabelecimento dinâmico de *lightpath* que deverá ser provido pelos elementos das redes ópticas futuras através de algoritmos inteligentes para estabelecimento e liberação das vias ópticas.

A seguir é apresentada uma revisão sobre as principais soluções citadas na literatura para roteamento e designação de comprimento de onda no problema RWA.

### 2.3.2. Roteamento

No roteamento em redes totalmente ópticas, há muitos aspectos a serem considerados para definição de protocolos e algoritmos que permitam o estabelecimento e liberação de vias ópticas [30].

Na ausência de conversores de comprimento de onda, um *lightpath* usa o mesmo lambda em todas as fibras por onde ele passa. Esta restrição, que é específica do roteamento em DWDM (não existe na rede IP, nem na rede telefônica), pode conduzir à utilização ineficiente dos comprimentos de onda e à degradação do desempenho, pelo bloqueio de conexões que pode causar devido à falta de um mesmo lambda na rota desejada.

Para transpor esta restrição, conversores de comprimento de onda podem ser introduzidos nos nós da rede, permitindo que um lambda seja ópticamente convertido em

outro. Entretanto, tecnologias de conversão de comprimento de onda ainda são imaturas. O custo destes conversores ainda é consideravelmente alto<sup>9</sup> e provavelmente permanecerá assim por algum tempo. Porém, eles serão elementos indispensáveis nas redes futuras [5].

Algoritmos RWA podem ou não considerar a utilização de conversores de comprimento de onda. Na literatura, redes roteadas por comprimento de onda com conversores ópticos são também conhecidas como redes *WI* (*wavelength interchangeable*) e as redes sem conversores são conhecidas como redes *WS* (*wavelength selective*) [7]. Os algoritmos RWA podem receber estes prefixos, conforme considerem ou não a utilização de conversores.

### 2.3.2.1. Soluções para o problema SLE

Vários estudos têm sido realizados para investigar soluções referentes ao problema RWA no estabelecimento de um conjunto estático de *lightpaths*. Estes estudos formulam o problema usando programação linear inteira (*Integer Linear Program - ILP*) ou confiam em soluções heurísticas na tentativa de minimizar o número de comprimentos de onda requisitados para estabelecimento de um conjunto dado de *lightpaths* [8, 22, 23].

As formulações em ILP são NP-completo e, portanto, podem ser resolvidas somente em sistemas muito pequenos. Em grandes sistemas, métodos heurísticos devem ser usados.

O sub-problema de designação de comprimento de onda do problema RWA pode por si só ser formulado como um problema de gráfico colorido, que é também NP-completo. Heurísticas de Greedy referentes ao problema de designação de comprimentos de onda para um conjunto estático de *lightpaths* tipicamente envolvem a ordenação dos comprimentos de onda e a designação do mesmo comprimento de onda para tantos *lightpaths* quanto possível, antes de tomar o próximo lambda [3].

O conjunto de *lightpaths* também pode ser ordenado por distância, de tal modo que os comprimentos de onda sejam designados para aqueles mais longos, antes de serem designados para os mais curtos. Todas estas heurísticas são extremamente CPU-

---

<sup>9</sup> Um módulo conversor de comprimento de onda chega a custar US\$ 77.000,00 segundo <http://shopper-search.cnet.com>.

intensivas e são soluções impraticáveis para serem implementadas por causa de sua complexidade usual [8].

Embora soluções tenham sido encontradas para resolver o problema SLE, elas baseiam-se geralmente em heurísticas complexas e na verdade não são bem adequadas para implementações práticas. Além disso, o problema SLE não considera qualquer tráfego dinâmico. Isso pode ser adequado para os *backbones* atuais, mas, num futuro bem próximo, a automação do gerenciamento de *lightpaths*, respondendo às necessidades de tráfego dinâmico, deve ser provida.

### 2.3.2.2. Estudos com base no DLE

Quando *lightpaths* são estabelecidos e liberados dinamicamente, decisões RWA devem ser tomadas assim que as requisições de conexão chegam ao nó. É possível que para uma dada requisição de conexão haja recursos de rede insuficientes para estabelecer o *lightpath*, o que fará com que esta requisição seja bloqueada. A conexão também pode ser bloqueada se não houver um mesmo lambda disponível em todos os enlaces ao longo da rota escolhida numa rede *WS*, quer seja por já estar utilizado ou por questão de falha na rede.

Para o caso DLE são definidos os seguintes tipos de roteamento [3-6, 22-23, 31]:

- **Roteamento fixo:** neste caso, há somente uma rota fixa (ex: a via mais curta) a ser utilizada para cada par de nós fonte e destino. Quando uma requisição de conexão chega a um nó, sempre a mesma rota será selecionada entre dois pontos e a rede tentará estabelecer um *lightpath* ao longo da mesma. No roteamento fixo, uma única rota fixa é pré-determinada para cada par fonte-destino. Se um mesmo comprimento de onda não estiver disponível em cada enlace da rota, então a conexão será bloqueada.

Uma solução para roteamento fixo pode ser implementada facilmente, entretanto, é muito limitada em termos de opções de roteamento e pode conduzir a um alto nível de bloqueio. Para minimizar o bloqueio em redes com roteamento fixo, as rotas pré-determinadas precisam ser selecionadas de maneira a balancear a carga igualmente através dos enlaces da rede. Esquemas de

roteamento fixo não requerem a manutenção da informação sobre o estado global da rede nos roteadores.

- **Roteamento fixo-alternado:** o roteamento fixo-alternado é uma variação do roteamento fixo. Neste caso, cada nó mantém uma tabela de roteamento que contém uma lista ordenada de rotas fixas para cada nó de destino. A busca e ordenação destas rotas podem ser efetuadas de uma maneira **fixa** (por exemplo, a primeira rota mais curta, a segunda, a terceira, etc) ou **adaptativa** (a ordenação é efetuada no momento da requisição, conforme a disponibilidade de recursos). A rota a ser estabelecida para uma conexão pode ser escolhida somente deste conjunto de rotas pré-determinadas.
- **Roteamento adaptativo:** neste caso, o roteamento baseia-se na disponibilidade de recursos em cada enlace durante o estabelecimento da conexão. Qualquer rota possível a partir do nó fonte até o destino pode ser candidata quando há uma requisição de conexão. A escolha de uma rota depende da política de rede utilizada tais como a primeira via de menor custo, a primeira via menos congestionada, etc.

De modo geral, a implementação do roteamento fixo é mais simples, enquanto o roteamento adaptativo fornece melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de requisições [3].

O roteamento fixo-alternado oferece um meio termo entre a sobrecarga de cálculo e o desempenho da rede, mas depende do número de rotas alternativas a serem consideradas [22].

Soluções para o roteamento adaptativo aumentam a probabilidade de estabelecimento de uma conexão por levarem em conta a informação do estado da rede, informação que por sua vez, pode ser global ou local.

A seguir as soluções para roteamento adaptativo são classificadas e detalhadas para melhor entendimento.

O roteamento adaptativo é classificado em [3,8]:

**A) Adaptativo Global**

- a. Centralizado
- b. Distribuído
  - i. Restrito
    - Fixo-alternado
  - ii. Irrestrito
    - *Link State*
    - *Distance-vector*

**B) Adaptativo Local**

- a. Por via alternada
- b. Por Deflexão

Cada uma destas implementações do roteamento adaptativo é explicada resumidamente a seguir.

**A) Roteamento Adaptativo com base na Informação Global**

Se a informação global do estado da rede estiver disponível, decisões de roteamento podem ser tomadas com base nos comprimentos de onda que estejam disponíveis em cada enlace. O roteamento adaptativo com base na informação global pode ter as seguintes implementações:

**a. Centralizado**

Na implementação centralizada, uma única entidade, como um gerenciador de rede, mantém informações completas sobre o estado da rede e é responsável por encontrar rotas e estabelecer *lightpaths* para as requisições de conexão. Como uma única entidade gerencia a rede toda, não é necessário um alto grau de coordenação entre os nós. Entretanto, uma entidade centralizada torna-se um ponto único de falha na rede e requer comunicação constante com todos os nós.

## b. Distribuído

Um algoritmo adaptativo distribuído que esteja baseado na informação global pode ser implementado de diferentes maneiras. Neste caso, não há uma entidade centralizando as informações, sendo necessária uma perfeita coordenação entre os nós.

O roteamento distribuído pode ser classificado como **restrito** ou **irrestrito** [28].

### i. Rotamento Restrito

No roteamento restrito uma via é selecionada de um subconjunto de vias possíveis, agrupadas e ordenadas segundo algum critério.

Como exemplo de roteamento restrito é possível citar o roteamento adaptativo fixo-alternado [8], descrito a seguir.

#### - Roteamento Adaptativo Fixo-Alternado

Uma solução para o roteamento adaptativo restrito com informação global é o roteamento fixo-alternado. Este tipo de roteamento confia em um conjunto de rotas fixas pré-determinadas entre um nó fonte e um nó destino. Quando uma requisição de conexão chega, uma única rota é escolhida de um conjunto de rotas pré-determinadas e um *lightpath* é estabelecido nesta rota. O critério para seleção da rota baseia-se tipicamente no comprimento ou no congestionamento da via, como explicado a seguir.

- **Seleção de Rota baseada no Comprimento da Via**

Um exemplo de algoritmo de roteamento restrito fixo-alternado que se baseia no comprimento da via é o algoritmo *K-shortest paths*, em que as primeiras K vias mais curtas são mantidas na tabela para cada par fonte-destino e em que as vias são selecionadas em ordem de comprimento, das mais curtas para as mais longas [3]. Uma tentativa de conexão é feita adotando-se a via mais curta. Se os recursos não estiverem disponíveis nesta via, nova tentativa é realizada, utilizando-se a próxima via mais curta. Como exemplos de implementação, pode-se citar os algoritmos **Alt** (*Alternate Routing*)



[23] e **AltMRPR** (*alternate minimum reconfiguration probability routing*) [22] os quais utilizam as N primeiras rotas alternativas mais curtas para estabelecimento do *lightpath*.

O algoritmo **AltMRPR** utiliza, além das rotas alternativas, as estatísticas de falha de roteadores e enlaces, selecionando as rotas mais confiáveis.

O parâmetro N pode ser programado, mas não é recomendada a utilização de muitas rotas alternativas para que as tabelas de roteamento não se tornem extensas, assim como as mensagens de divulgação de rotas.

- **Seleção de Rota baseada no Congestionamento da Via**

Neste caso, uma política de seleção de via baseada em congestionamento examina os recursos em cada uma das vias alternativas e escolhe aquela onde há mais recursos disponíveis. No caso do DWDM seriam escolhidos os enlaces com maior número de comprimentos de onda disponíveis. Este tipo de roteamento também é chamado de LCP (*Least-congested-path*) [8].

Como exemplos de algoritmos com roteamento restrito fixo-alternado que levam em conta o congestionamento da via pode-se citar o algoritmo **LLR** (*Least-Loaded Routing*) [29] e o algoritmo **AltMCR** (*minimum congested routing*) [30].

O algoritmo **LLR** escolherá a via menos congestionada a partir de um conjunto de N vias alternativas mais curtas.

O algoritmo **AltMCR** é semelhante ao **LLR**, mas primeiro busca as rotas menos congestionadas, independente de serem as mais curtas ou não, com base no algoritmo *distance-vector*. Entre as rotas escolhidas poderá, então, selecionar as N mais curtas.

- **Comparação da Seleção de Rota com base em Congestionamento e Comprimento da Via**

A escolha de rota com base na via mais curta consome menos recursos da rede, mas pode conduzir a altas cargas em alguns enlaces, enquanto que escolher a via menos congestionada pode conduzir a vias mais longas, mas que distribuem a carga mais igualmente sobre a rede. Há algoritmos RWA implementados para as duas condições e o desempenho de um ou de outro pode ser superior, dependendo da topologia e da carga de tráfego na rede [22, 23, 29, 30].

## ii. Roteamento Irrestrito

No roteamento irrestrito, uma via é selecionada a partir da consideração de todas as vias possíveis entre fonte e destino. Esta seleção é efetuada através da execução de um algoritmo que busca a via mais curta de forma dinâmica, com custos de enlace obtidos do estado atual da rede no momento do estabelecimento da conexão.

Dois exemplos de solução com roteamento irrestrito são os roteamentos *link-state* e *distance vector*.

### - Roteamento *Link-State*

Numa solução distribuída com roteamento *link-state*, cada nó na rede deve manter a informação completa do estado da mesma. Um custo é atribuído a cada enlace e a rota selecionada será a de menor custo. Cada nó pode então encontrar uma rota para uma requisição de conexão de uma maneira distribuída. Sempre que o estado da rede muda, todos os nós devem ser informados. Portanto, o estabelecimento ou remoção de um *lightpath* na rede pode resultar na difusão de mensagens de atualização para todos os nós da rede. A necessidade de difundir mensagens de atualização pode resultar em *overhead* significativo de controle. Além disso, é possível que um nó tenha informação antiga e tome uma decisão de roteamento incorreta baseada na mesma [7].

Alguns esforços têm sido feitos para melhorar os algoritmos de via mais curta, usando roteamento *link-state*. Maiores detalhes podem ser encontrados em [3].

Como exemplos de algoritmos RWA irrestritos com roteamento *link-state* podem ser citados:

- **AUR:** uma versão estendida do roteamento adaptativo irrestrito (*Adaptive Unconstraint Routing*) para selecionar a via, utilizando o número mínimo de *hops* entre os roteadores fonte e destino [28];
- **MRPR:** algoritmo com mínima probabilidade de reconfiguração (*Minimum Reconfiguration Probability Routing*) similar ao AUR, mas que leva em conta também as estatísticas de falha dos enlaces e roteadores da rede [22], estabelecendo as rotas mais confiáveis (com menor probabilidade de reconfiguração).

### - Roteamento Distance-vector

Uma solução *distance-vector* para roteamento irrestrito com informação global também pode ser implementada. Esta solução não requer que cada nó mantenha informação completa de *link-state* como no caso anterior, mas, ao invés disso, é mantida uma tabela de roteamento que indica para cada destino e cada comprimento de onda, o próximo *hop* para o destino e a distância até o mesmo. A solução confia no algoritmo distribuído de Bellman-Ford [32] para manter as tabelas de roteamento [3].

Neste caso, o método também requer que os nós atualizem a tabela de roteamento sempre que uma conexão for estabelecida ou liberada. Para esta atualização ser realizada, cada nó tem que enviar atualizações de roteamento para seus vizinhos periodicamente ou sempre que o status dos enlaces de saída dos nós é alterado. Embora cada nó mantenha menos informação que no roteamento *link state* e as atualizações não sejam difundidas para todos nós, o esquema pode ainda sofrer de auto grau de *overhead* de controle.

Um exemplo de algoritmo que utiliza roteamento *distance-vector* pode ser encontrado em [30].

- **Comparação entre Roteamento *Distance-Vector* e *Link-State* no problema RWA**

Quando for possível o conhecimento global da rede, os roteamentos *distance-vector* e *link-state* [32] são duas possibilidades para o modo irrestrito, conforme apresentado.

Os estudos mostram que os algoritmos *link-state* apresentam melhores resultados que os *distance-vector* devido ao menor atraso na convergência e ao menor bloqueio em baixas cargas [8].

Apesar disso, a principal desvantagem dos algoritmos *distance-vector* é que eles não são adequados, como muitos algoritmos *link-state*, quando se considera a questão da engenharia de tráfego. Particularmente, a maior vantagem de algoritmos *link-state* é a de que cada nó tem um conhecimento global da rede. Isso torna mais fácil a descoberta de rotas explícitas de um nó fonte para um destino, adicionando maior tolerância a falhas na rede. Por exemplo, é possível incluir capacidades de restauração nos algoritmos quando os nós possuem total conhecimento da rede.

Métodos de roteamento com base no conhecimento global da rede devem manter um grande montante de informação de estado. Na verdade, esquemas que se baseiam no conhecimento global podem ser bem adequados para redes em que *lightpaths* são bem estáticos e alteram-se pouco com o tempo. Uma alternativa é o roteamento adaptativo com base na informação local, como explicado a seguir.

### **B) Roteamento Adaptativo com base na Informação Local**

Os sistemas emergentes devem ser estáticos, com *lightpaths* sendo estabelecidos por longos períodos de tempo. É esperado que, conforme o tráfego da rede aumente e torne-se cada vez mais em rajadas, um alto grau de multiplexação e flexibilidade seja solicitado na camada óptica [3].

Na verdade, o estabelecimento de *lightpath* tornar-se-á mais dinâmico em sua natureza, com requisições de conexão chegando em altas taxas e os *lightpaths* sendo estabelecidos para curtas durações de tempo [7].

Em tais situações, estima-se que manter a informação global distribuída torne-se impossível. Uma alternativa é implementar esquemas de roteamento que confiem somente na informação local.

Alguns métodos de roteamento adaptativo confiam na informação local ao invés da informação global da rede. A vantagem do uso da informação local é que nesse caso os nós não precisam manter uma quantidade muito grande de informação de estado. Entretanto, as decisões de roteamento tendem a ser menos precisas que no caso da informação global.

Dois exemplos de esquemas de roteamento adaptativo que se baseiam na informação local são o **roteamento por via alternada** com informação local (variante do caso LCP com informação global para os  $k$  primeiros enlaces de cada via) que pode utilizar a disponibilidade de  $\lambda$  global ou local, e o **roteamento por deflexão** que seleciona enlaces alternativos na base *hop-by-hop* (indica para cada destino um ou mais enlaces de saída – mais curto ou menos congestionado) ao invés de rotas alternativas na base fim-a-fim [8].

A tabela 2.1 resume os tipos de roteamento para o problema RWA.

Tabela 2.1 – Tipos de Roteamento no Problema RWA [3]

CLASSIFICAÇÃO DOS ALGORITMOS RWA	ROTEAMENTO	CRITÉRIO DE SELEÇÃO DE VIA
<b>Estático (Fixo)</b>	Fixo	Utiliza sempre a mesma via entre fonte e destino.
	Fixo - Alternado	Seleciona uma via de um conjunto de vias ordenadas segundo algum critério fixo.
<b>Adaptativo (informação global)</b>	Centralizado	Um gerenciador concentra a seleção dos <i>lightpaths</i> .
	Distribuído Restrito Fixo-Alternado	Seleciona as vias alternativas mais curtas.
		Seleciona as vias alternativas menos congestionadas.
	Distribuído Irrestrito	<i>Link state</i> .
<i>Distance Vector</i> .		
<b>Adaptativo (informação local)</b>	Via Alternada	Com conhecimento da disponibilidade de $\lambda$ fim-a-fim.
		Com conhecimento da disponibilidade de $\lambda$ localmente.
	Por Deflexão	Seleciona o enlace mais curto em cada trecho.
		Seleciona o enlace menos congestionado em cada trecho.

Em [28] mostra-se que o algoritmo fixo-alternado com duas vias alternativas possui um desempenho intermediário entre os algoritmos fixo e adaptativo irrestrito, podendo servir como opção quando se deseja menor complexidade na implementação.

Também é demonstrado que o roteamento irrestrito possui desempenho superior ao restrito principalmente em redes mais densas, pois se beneficia das múltiplas vias disponíveis.

### 2.3.3. Designação de Comprimento de Onda (WA)

O problema WA é a outra parte do problema RWA. Ele é geralmente de mais fácil resolução que o problema de roteamento, mas depende também do resultado da solução deste [3].

Geralmente, se há múltiplos comprimentos de onda possíveis entre um nó fonte e um destino, então se faz necessário um algoritmo para selecionar um deles para um dado *lightpath*. A seleção do comprimento de onda pode ser efetuada após a rota ter sido determinada ou, em paralelo, durante a procura da mesma [8, 30].

Como numa rede **WS** o mesmo comprimento de onda deve ser usado em todos os enlaces, é importante que este seja escolhido de modo a reduzir o bloqueio das conexões subsequentes.

Uma revisão de soluções para designação de comprimento de onda pode ser encontrada em [3, 4, 22, 23 e 28].

Algoritmos WA normalmente são desenvolvidos para redes sem conversão de comprimento de onda, visto que, se há conversão, o lambda pode ser escolhido de forma aleatória em qualquer enlace [5, 22].

Assim como no roteamento, a designação de comprimento de onda também pode ser feita de uma maneira fixa ou adaptativa [28].

Quando fixa, o conjunto de possíveis lambdas é obtido segundo um critério fixo. Por exemplo, os lambdas podem ser ordenados e indexados, selecionando-se o de menor índice que estiver disponível.

Quando a designação é adaptativa, o conjunto de possíveis lambdas é verificado no momento da requisição de conexão, com a ordem de busca sendo modificada dinamicamente conforme o estado da rede e o critério adotado. Por exemplo, pode-se utilizar o lambda mais usado ou o menos usado na rede. Para fazer esta classificação, é necessário receber constantemente o status da rede, o que altera a ordenação dos lambdas dinamicamente.

Os algoritmos WA normalmente utilizados são heurísticos e podem ser classificados do seguinte modo [7]:

- a) Balanceamento de Carga: estes algoritmos balanceiam a carga na rede entre diferentes lambdas, de modo que todos possam ser utilizados. Exemplos deste

tipo de algoritmo são *least-used* (ou *spread*) e *random*. Normalmente o desempenho destes algoritmos é inferior aos outros tipos de algoritmos WA.

- b) Agrupamento: estes algoritmos concentram a utilização dos lambdas numa faixa, fazendo com que sejam selecionados em vários pontos da rede. Exemplos deste tipo de algoritmo são: *first-fit*, *most-used* (ou *pack*), *min-product*, *least loaded*. São de fácil implementação e eficientes quando a informação sobre o estado da rede é precisa.
- c) Globais: consideram o problema RWA do ponto de vista global, selecionando os lambdas conforme o status da rede. São os que possuem melhor desempenho, embora sejam mais difíceis de implementar, exigindo mais cálculo, o que dificulta a escalabilidade. Exemplos deste tipo de algoritmo são: *relative capacity loss* (RCL), *distributed relative capacity loss* (DRCL) e *max-sum* (MS).

Alguns destes algoritmos são explicados a seguir.

#### i) **Heurística WA *First-fit***

Um exemplo de uma simples, mas eficiente, heurística para designação de comprimento de onda é o *first-fit*. Neste caso, os comprimentos de onda são indexados e um *lightpath* tenta selecionar aquele com o menor índice, antes de tentar selecionar outro com um índice mais alto. Realizando a seleção desta maneira, as conexões existentes estarão concentradas em um número menor de comprimentos de onda, liberando um grande número de lambdas para os próximos *lightpaths*. Os algoritmos **AUR**, **MRPR**, **Alt** e **MCR** utilizam a heurística *first-fit* para designação de comprimento de onda no simulador adotado neste trabalho.

#### ii) **Heurística WA *Random***

Outra solução para escolher comprimentos de onda, compreende simplesmente a solução de um deles aleatoriamente. Nisto consiste a Heurística WA *Random*. Em geral, a heurística *first-fit* possui desempenho melhor que a *random* quando é possível o conhecimento global do estado da rede.

Entretanto, se a seleção de comprimento de onda for feita de uma maneira distribuída com informação limitada ou desatualizada, então, a designação aleatória pode apresentar desempenho melhor que a *first-fit*. A razão para este comportamento é que no *first-fit*, se múltiplas conexões estão tentando estabelecer um *lightpath* simultaneamente, então é mais provável que elas escolham o mesmo comprimento de onda, levando ao bloqueio de uma ou mais conexões.

Nos casos em que são utilizados conversores de comprimento de onda, o algoritmo *random* é o algoritmo utilizado.

### iii) Heurísticas WA Mais usado e Menos usado

Outras heurísticas simples de designação de comprimento de onda são aquelas chamadas de mais usado (*most-used*) e de menos usado (*least-used*).

Na designação de comprimento de onda *most-used*, o comprimento de onda mais usado na rede é selecionado. Esta solução tenta prover o máximo reuso de comprimento de onda na rede.

A solução *least-used* tenta espalhar a carga igualmente através de todos os comprimentos de onda pela seleção do menos usado em toda a rede.

Ambas soluções requerem conhecimento global do status da rede.

O algoritmo **LLR**, que é uma das opções no simulador deste trabalho (vide capítulo 4), utiliza a heurística *Most-used* para seleção do comprimento de onda.

Em [28] é possível verificar que o algoritmo WA *most-used* possui desempenho melhor que o do *random* e o do *least-used* e desempenho semelhante ao do *first-fit* quanto ao bloqueio de conexões, embora este último seja bem menos complexo em sua implementação. Mostra-se também que este resultado é mais significativo para um número maior de lambdas, pois no caso de poucos lambdas, o fator mais limitante é a falta de recursos.

### iv) Heurísticas WA mais Avançadas

Algumas heurísticas de designação de comprimento de onda mais avançadas, que confiam na informação do estado global da rede, têm sido propostas. Supõe-se nestas



heurísticas, que o conjunto de possíveis *lightpaths* futuros seja conhecido antecipadamente.

Para uma dada conexão, as heurísticas tentam escolher um comprimento de onda que minimize o número de *lightpaths* no conjunto de futuros *lightpaths* que serão bloqueados por esta conexão.

Algoritmos como MAX-SUM, RCL e DRCL são alguns exemplos e oferecem melhor desempenho que outros algoritmos heurísticos [4, 5].

O algoritmo MAX-SUM seleciona um comprimento de onda de tal modo que a capacidade após o estabelecimento da via seja máxima, ou seja, o lambda utilizado esteja o mais disponível possível na rede em outros enlaces.

O algoritmo RCL é uma melhoria do MAX-SUM e ambos trabalham em esquemas com roteamento fixo e fixo-alternado.

O DRCL é uma melhoria do RCL para ser utilizado em ambiente com controle distribuído e roteamento adaptativo. Ele é o que possui melhor desempenho de todos por considerar a carga na rede quando seleciona uma rota.

A tabela 2.2 resume os principais tipos de heurísticas para designação de comprimento de onda utilizados nos algoritmos RWA.

Tabela 2.2 – Tipos de Heurística para Designação de Comprimento de Onda [5]

CLASSIFICAÇÃO DAS HEURÍSTICAS WA	DESIGNAÇÃO	CRITÉRIO DE SELEÇÃO DE LAMBDA
Balanceamento de carga	<i>Least-used</i>	Seleciona os lambdas menos usados na rede.
	<i>Random</i>	Seleciona os lambdas de maneira aleatória.
Agrupamento	<i>First-fit</i>	Os lambdas são indexados e tenta-se selecionar os de menor índice.
	<i>Most-used</i>	Busca-se selecionar o lambda mais utilizado na rede.
	<i>Min-product</i>	Utilizado para redes multi-fibras. Multiplica o número de fibras em cada enlace pelo número de lambdas disponíveis em cada um. Aloca o lambda que minimiza este valor.
	<i>Least-loaded</i>	Utilizado para redes multi-fibras. Seleciona o lambda com a maior capacidade residual para o enlace com maior carga ao longo da rota.
Globais	<i>MAX-SUM</i>	Seleciona o lambda de modo que a capacidade da via após o estabelecimento do <i>lightpath</i> seja máxima.
	<i>Relative Capacity Loss (RCL)</i>	Calcula a perda de capacidade relativa para cada via para cada lambda disponível e então seleciona aquele que minimiza a soma da perda de capacidade relativa em todas as vias.
	<i>Distributed Relative Capacity Loss (DRCL)</i>	Melhoria do RCL para utilização com roteamento adaptativo.

Mais detalhes quanto ao desempenho de várias heurísticas para o problema WA podem ser encontradas em [5-8 e 28].

#### 2.3.4. Sinalização e Reserva de Recursos

Para estabelecer um *lightpath*, é necessário um protocolo de sinalização para troca de informação de controle entre os nós e para reserva de recursos ao longo da via. Em muitos casos, o protocolo de sinalização está integrado aos algoritmos RWA.

Protocolos de sinalização e de reserva de recursos podem ser classificados, baseando-se no modo como os recursos são reservados em cada enlace: em paralelo ou

na base *hop-by-hop* (ao longo da via direta ou reversa) [8]. Estes protocolos também diferem nos casos em que a informação global está disponível ou não.

No caso da reserva em paralelo, o esquema de controle reserva lambdas em múltiplos enlaces em paralelo.

No caso *hop-by-hop* uma mensagem de controle é enviada ao longo da rota selecionada, um trecho (*hop*) por vez. A mensagem de controle é processada em cada nó antes de ser passada para o próximo. Quando chega ao nó de destino, ela é processada e enviada de volta ao nó fonte. A reserva de recursos pode ser efetuada enquanto a mensagem de controle é enviada ao destino (via direta) ou quando ela for enviada de volta para a fonte (via reversa). Mais detalhes podem ser encontrados em [1, 3, 8].

### 2.3.5. Políticas de Retenção

Para melhorar a probabilidade de estabelecimento da conexão ao custo de altos tempos de configuração, é possível reter ou armazenar as requisições de conexão nos nós intermediários, caso os recursos de comprimento de onda não estejam imediatamente disponíveis.

Se um comprimento de onda apropriado se torna disponível, a requisição de conexão continuará em direção ao destino. Se após esperar algum tempo, os recursos apropriados não se tornarem disponíveis, então, a conexão será bloqueada.

Comenta-se em [3] que uma política de retenção diminui a probabilidade de bloqueio, sem aumentar significativamente o tempo de configuração. Entretanto, mostra-se também que uma política de retenção reduz a vazão da rede se comparada com a política em que as chamadas são bloqueadas imediatamente quando os recursos não estão disponíveis.

### 2.3.6. Pesquisas sobre o Problema RWA

Diversas pesquisas têm sido realizadas para aprimorar as soluções para o problema RWA e o desempenho das redes totalmente ópticas, buscando-se a compreensão de seus limites diante de uma carga com tráfego dinâmico e sugerindo respostas para as mais diversas questões.

Há vários exemplos de trabalhos que se dedicam a estes estudos e às soluções propostas para o problema RWA em várias situações.

Os diferentes esquemas de designação de comprimento de onda quanto ao bloqueio de conexões, variando-se o número de lambdas e as métricas dos algoritmos de roteamento, são comparados em [3]. Um bloqueio de conexões de 5% é tomado como referência, sendo considerado satisfatório o desempenho da rede, quando o limite de bloqueio fica abaixo deste valor. Acima deste valor, o bloqueio é considerado elevado, podendo afetar o desempenho da rede.

Em [6], compara-se o desempenho da rede em termos de bloqueio para esquemas de roteamento *hop-by-hop* com roteamento estático e roteamento dinâmico utilizando-se técnica de *grooming* entre as camadas IP e óptica. As vantagens do roteamento dinâmico numa rede do tipo *peer* integrada ficam evidentes.

Em [7] são estudados os efeitos da imprecisão do status da rede no desempenho da mesma quando se utiliza tráfego dinâmico com diferentes esquemas de seleção de comprimento de onda. O estudo mostra que uma rede com conversores e multi-fibras é menos sensível à informação imprecisa de estado.

Em [8] são comparados os desempenhos dos algoritmos *link-state* e *distance-vector* numa rede GMPLS com tráfego dinâmico que utiliza informação de status global.

Em [22] é proposto um algoritmo RWA chamado MRPR, que utiliza as estatísticas de falha dos nós e dos enlaces, para estabelecer rotas mais confiáveis, diminuindo a probabilidade de reconfiguração de *lightpaths*. São realizadas comparações com o algoritmo AUR para demonstrar o melhor desempenho do algoritmo MRPR tanto em termos de bloqueio quanto na probabilidade de reconfiguração quando há falhas na rede.

Em [26] são propostos e comparados algoritmos para redes translúcidas, que determinam pontos de regeneração, a partir da utilização de transmissores e receptores ociosos nos nós. Mostra-se que *lightpaths* com limitação de distância, impossíveis de serem roteados em redes totalmente ópticas, podem ser roteados nas redes translúcidas, embora o controle torne-se mais complexo.

A importância de se considerar os conversores de comprimento de onda e sua distribuição na rede ficam evidentes no trabalho desenvolvido em [27], que demonstra a superioridade dos algoritmos propostos sobre outros existentes em diferentes topologias.

Em [28] é apresentado o algoritmo AUR, que busca todas as possíveis rotas entre fonte e destino, selecionando as mais curtas, comparando-se seu desempenho em redes multifibras e em diferentes esquemas de designação de comprimento de onda.

Em [29] é apresentado o algoritmo LLR que leva em conta o congestionamento dos enlaces ópticos, selecionando o par rota-comprimento de onda mais curto e com menor carga. Seu desempenho quanto ao bloqueio de conexões é comparado com o do roteamento fixo de via mais curta em tráfego dinâmico, demonstrando-se sua superioridade.

Em [30] é desenvolvido o algoritmo MCR tanto para redes **WS** como para redes **WI**. Este algoritmo seleciona as rotas menos congestionadas, com base no algoritmo *distance-vector* usando como critério de desempate o comprimento de via e o número de conversores utilizados. Este trabalho mostra em detalhes todos os parâmetros que afetam o desempenho de um algoritmo RWA. Comenta-se e demonstra-se nas simulações que quando a carga é muito alta, as limitações de recurso dominarão as figuras de bloqueio escondendo os efeitos dos algoritmos sobre o desempenho da rede.

Em [31], uma revisão sobre vários trabalhos de pesquisa elaborados para desenvolvimento de algoritmos RWA pode ser encontrada.

Todos estes trabalhos mostram a importância da seleção de algoritmos RWA para cada situação e como os mesmos afetam o desempenho em relação ao bloqueio de conexões numa rede totalmente ótica com tráfego dinâmico.

Estes trabalhos servem como motivação e referência para o estudo aqui proposto.

## **2.4. Conclusão**

Pelo exposto neste capítulo conclui-se que o roteamento óptico é um novo conceito que traz novos desafios, sendo que a solução do problema RWA de maneira adequada é a questão chave para um ótimo desempenho de uma rede totalmente ótica.

O interesse principal está nos algoritmos RWA para tráfego dinâmico com informação global, principalmente do tipo fixo-alternado e adaptativo que apresentam melhor desempenho.

A utilização de conversores de comprimento de onda torna-se praticamente obrigatório no futuro para diminuir a probabilidade de bloqueio das conexões num ambiente com tráfego dinâmico.

O dimensionamento de uma rede totalmente óptica é um desafio devido aos vários fatores que afetam a determinação de uma via fim-a-fim e às novas restrições que se apresentam.

A necessidade de um novo plano de controle para reserva de recursos e estabelecimento dinâmico dos *lightpaths* numa rede totalmente óptica é evidente e requer soluções, como apresentado no próximo capítulo.

### 3. FUNDAMENTOS DO GMPLS

#### 3.1. Introdução

O GMPLS é uma generalização do MPLS. Ele usa a mesma suíte de protocolos de sinalização e roteamento empregada em redes IP/MPLS.

A suíte de protocolos GMPLS provê a implementação de um plano de controle distribuído flexível, eficiente e escalável [10, 11].

O GMPLS é fundamentado sobre uma rede óptica, permitindo que a camada IP aja diretamente sobre a mesma, endereçando recursos como comprimentos de onda, fibras, time-slots, etc. através de rótulos (*labels*).

O GMPLS poderá atuar sobre uma rede totalmente óptica e, neste caso, para o cálculo de rotas fim-a-fim utilizará algoritmos RWA para designação automática do par rota/comprimento de onda, atendendo às requisições de conexão [9].

O GMPLS baseia-se nas seguintes inovações técnicas em relação ao MPLS [10, 11]:

- LSPs (*Label-Switched Path*) Hierárquicos;
- LSPs bidirecionais;
- Melhoria da escalabilidade do roteamento IGP-TE (*Interior-Gateway Protocol-Traffic Engineering*) pela utilização de:
  - enlaces não numerados;
  - enlaces TE e agregação de enlaces (*link bundling*);
  - adjacência de encaminhamento (*FA - forwarding adjacency*);
- Protocolo de gerenciamento de enlace (LMP – *Link Management Protocol*).

O estabelecimento de um LSP numa rede MPLS envolve a configuração de cada LSR (*Label Switching Router*) intermediário, para mapear um *label* e porta de entrada em um *label* e porta de saída, permitindo a configuração de uma via fim-a-fim no ambiente IP. Similarmente, o processo para estabelecimento de um *lightpath* numa rede GMPLS envolve a configuração de cada *switch* fotônico intermediário para mapear um *lambda* e porta de entrada em um *lambda* e porta de saída.

O GMPLS separa claramente o plano de controle (sinalização e roteamento) do plano de encaminhamento de dados (transporte).

No GMPLS, um rótulo (*label*) não é mais um identificador abstrato, mas sim um identificador que deve referenciar *time-slots*, comprimentos de onda e recursos físicos como as portas de um *switch*. Isso requer que uma associação destes rótulos generalizados com os recursos da rede seja criada entre os nós adjacentes.

A definição de *labels* para incluir os domínios ópticos requer a redefinição do *label* MPLS, o que resulta em uma hierarquia que se estende desde a comutação de pacotes até a comutação de fibras (portas) para estabelecimento de uma via fim-a-fim.

A tabela 3.1 resume a suíte de protocolos do GMPLS e as novas características introduzidas em relação ao MPLS. A figura 3.1 mostra a pilha de protocolos utilizados pelo GMPLS. Ambas foram extraídas de [24].

**Tabela 3.1 - Suíte de Protocolos do GMPLS [24].**

Protocolos		Descrição
<b>Roteamento</b>	<b>OSPF-TE/ IS-IS-TE</b>	Protocolos de roteamento para autodescobrimento da topologia da rede, criação da tabela de roteamento e anúncio da disponibilidade de recursos (ex.: largura de banda e tipo de proteção). As melhorias em relação ao MPLS são: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Anúncio do tipo de proteção de enlace (1+1, 1:1, não protegido e tráfego extra);</li> <li>- Implementação de enlaces derivados (adjacência de encaminhamento) para melhoria da escalabilidade;</li> <li>- Aceitação e anúncio de enlaces sem endereços IP, utilizando ID do enlace (<i>link ID</i>);</li> <li>- ID de interface de entrada e de saída;</li> <li>- Descoberta de rota de proteção que seja diferente da via primária (<i>SRLG – Shared Risk Link Group</i>).</li> </ul>
<b>Sinalização</b>	<b>RSVP-TE ou CR-LDP</b>	Protocolos de sinalização para o estabelecimento de LSPs com engenharia de tráfego. As principais melhorias em relação ao MPLS são: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilização de <i>label</i> para incluir redes que não sejam de pacotes (<i>labels</i> generalizados);</li> <li>- Estabelecimento de LSPs bidirecionais;</li> <li>- Sinalização para estabelecimento de via de proteção (informação de proteção);</li> <li>- Designação de <i>label</i> via “<i>label</i> sugerido”;</li> <li>- Suporte a comutação de banda de onda (conjunto de comprimentos de onda comutados juntos).</li> </ul>
<b>Gerenciamento de Enlace</b>	<b>LMP</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Gerenciamento de Canal de Controle:</b> negociar os parâmetros do enlace (ex.: frequência de envio de mensagens “<i>keep-alive</i>”) e assegurar a saúde do enlace (protocolo <i>hello</i>)</li> <li>- <b>Verificação da Conectividade do Enlace:</b> assegura a conectividade física do enlace entre nós vizinhos utilizando uma mensagem de teste como PING;</li> <li>- <b>Correlação da Propriedade do Enlace:</b> identificação das propriedades do enlace de nós adjacentes (ex.: mecanismo de proteção);</li> <li>- <b>Isolação de Falhas:</b> isola uma única ou múltiplas falhas no domínio óptico.</li> </ul>



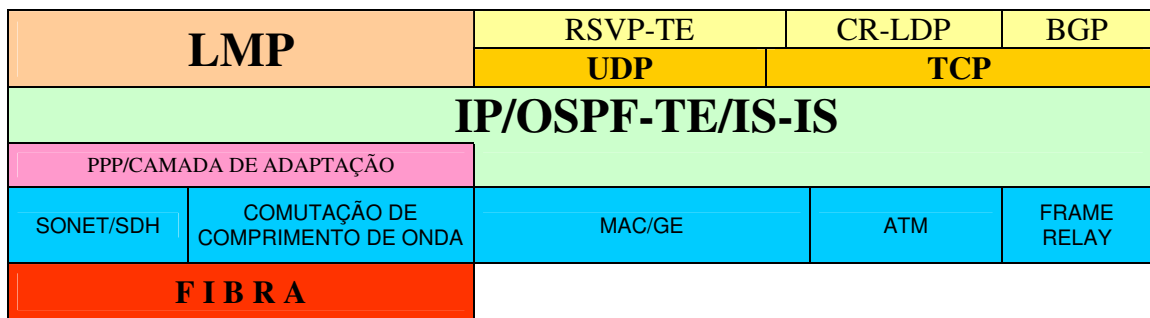


Figura 3.1 - Pilha de Protocolos do GMPLS [24].

### 3.2. Roteamento GMPLS

O roteamento GMPLS refere-se à disseminação da alcançabilidade, topologia e informações de capacidade/recursos por toda a topologia de roteamento do plano de controle.

O roteamento dinâmico em redes ópticas inteligentes baseia-se no modelo de roteamento com restrição do GMPLS [6].

O cálculo de via óptica com restrição é utilizado para selecionar *lightpaths* sujeitos aos recursos especificados e/ou às restrições de política da rede.

Um seletor de *lightpath* calcula um ou diversos *lightpaths* para uma dada requisição de conexão, com o objetivo de otimizar certos parâmetros de rede (ex: utilização dos recursos).

Na seleção de *lightpath*, são utilizados algoritmos RWA para cálculo das rotas e designação do comprimento de onda. Após um *lightpath* ser selecionado, o protocolo de sinalização é convocado para estabelecer a conexão.

Protocolos como o RSVP-TE ou CR-LDP são exemplos de protocolos de sinalização usados no GMPLS para sinalizar o estabelecimento de um *lightpath*, conforme já comentado.

Em geral, o cálculo de *lightpaths* é um desafio devido às características únicas das redes ópticas roteadas por comprimento de onda. Para isso são utilizados pelo GMPLS algoritmos RWA, que permitem o cálculo da via com base na política de roteamento adotada.

O GMPLS provê extensões de roteamento de engenharia de tráfego adicionais ao MPLS-TE para interfaces que não sejam de dados/pacotes (SONET/SDH, DWDM).

Para utilizar os recursos mais eficientemente, o algoritmo de cálculo de via precisa levar em consideração várias restrições de TE. Na verdade, o roteamento com base em restrição vai além do tradicional algoritmo SPF (*Shortest Path First*). Estas restrições incluem restrições intrínsecas tais como as capacidades do enlace TE (quadro, proteção, etc), sua disponibilidade de recursos (largura de banda, etc) e restrições extrínsecas tais como o nível de serviço requisitado e o tempo médio de recuperação.

Em resumo, o roteamento com base em restrição deve considerar as restrições intrínsecas e extrínsecas a fim de calcular a via mais adequada que as preencha.

Para tornar o cálculo da via baseada em restrição possível, o LSR, que inicia a requisição do LSP, precisa de mais informação (isto é, atributos) sobre a terminação dos enlaces TE do tipo não-pacote (*non-packet*), que os protocolos de roteamento intradomínio provêm para as redes IP/MPLS.

Estes atributos TE são difundidos através do uso dos mecanismos de disseminação (*flooding*) dos já estendidos protocolos de roteamento de *link-state* intradomínio (tais como o OSPF-TE e IS-IS-TE), enquanto o cálculo e os algoritmos de seleção de via são mantidos em sua especificidade pelos fabricantes, providos os atributos TE que são semanticamente padronizados [10]. Isso significa que os protocolos de roteamento e sinalização deverão ser padronizados para o GMPLS, assim como os atributos divulgados nas mensagens de advertência. Porém, os algoritmos que utilizam a informação da topologia e os novos atributos ficarão em aberto, podendo ser escolhidos pelos fabricantes.

A eficiência computacional do algoritmo de cálculo da via baseada em restrição também depende fortemente da experiência alcançada através do MPLS-TE, que, por sua vez, reforça a uniformidade da solução GMPLS.

As redes de transporte ópticas de próxima geração com base no GMPLS podem usar protocolos de roteamento para difundir e manter o status de recursos da rede. A partir deste status, o algoritmo RWA pode calcular dinamicamente uma rota e o correspondente lambda para cada *lightpath*. Quando uma requisição de *lightpath* chega ao nó, um protocolo de sinalização é iniciado para reservar os recursos de rede que foram designados para este *lightpath* pelo algoritmo RWA [5].

Um protocolo de roteamento como o OSPF-TE difunde o estado de cada enlace da rede periodicamente para todos os nós. Os algoritmos RWA podem, então, selecionar rotas e comprimentos de onda para os *lightpaths* requisitados.

Uma requisição de conexão pode ser iniciada pela seleção de uma página WEB, pela tentativa de conexão com um provedor de serviço ou quando um roteador IP ou outro elemento de rede identifica uma demanda entre dois PXCs (*photonic cross-connect*) [8].

Um protocolo de sinalização como o RSVP-TE, que roda sobre o IP, pode ser, então, utilizado para sinalizar os requisitos de recurso de uma aplicação para roteadores intermediários, estabelecendo a conexão.

Este processo é adequado para uso em um único domínio, o qual empregue os mesmos protocolos de roteamento e sinalização. As questões para roteamento e sinalização interdomínio são mais complexas e exigem maior cuidado quando se trata do estabelecimento dinâmico de *lightpaths* em um ambiente global [5].

As extensões para o roteamento interdomínio (ex.: BGP) requerem estudo posterior devido à função chave efetuada pelo BGP dentro do vasto mundo da Internet.

### 3.3. Estrutura de Roteamento com base no GMPLS

O problema RWA é agora uma parte do trabalho submetido a vários grupos do IETF tais como o CCAMP, MPLS, OSPF e ISIS [3, 10]. A seguir são apresentadas algumas tendências para tornar a interconexão óptica uma realidade em todas as redes ópticas.

Há atualmente um grande interesse em automatizar o estabelecimento e a liberação de *lightpaths* em uma rede de transporte óptica.

A tendência é utilizar um plano de controle na camada óptica, ao invés de um plano de gerenciamento, utilizado tradicionalmente para prover *lightpaths*.

Espera-se que um plano de controle inteligente na camada óptica ofereça vários benefícios, incluindo o rápido provisionamento de circuitos, flexibilidade de serviço, tal como prover largura de banda por demanda, interoperabilidade dos elementos de rede de diferentes fornecedores, e melhor capacidade de sobrevivência para roteamento dinâmico na ocorrência de falhas [4].

Um ponto em comum é que o plano de controle, isto é, roteamento e sinalização para a camada óptica, deve ter como base o reuso dos protocolos de plano de controle existentes para reduzir ciclos de desenvolvimento de produto e estimular o desenvolvimento rápido de uma nova classe de elementos ópticos [3].

O GMPLS é proposto como solução de plano de controle para as redes ópticas de nova geração, habilitando LSPs generalizados, tais como *lightpaths*, para serem automaticamente estabelecidos e liberados por meio de um protocolo de sinalização. A base da estrutura do GMPLS é definida em [11].

Extensões para os IGPs, tais como OSPF e IS-IS, permitirão aos nós a troca de informações sobre a topologia da rede óptica, a disponibilidade de recursos e de restrições administrativas como definido em [16-17].

A sinalização GMPLS estende certas funções básicas do RSVP-TE e CR-LDP e, em alguns casos, adiciona funcionalidades [12-15]. Estas mudanças e adições têm impacto por exemplo: nas propriedades básicas do LSP, no modo como os *labels* são requisitados e comunicados, na natureza unidirecional dos LSPs, no modo como os erros são propagados e a informação provida para sincronizar os nós de ingresso e de egresso.

O roteamento dinâmico de *lightpath* em redes IP sobre WDM utiliza a proposta do GMPLS com modelo de roteamento baseado em restrição. Por exemplo, o OSPF é um protocolo *link-state* em que o estado de cada enlace na rede é periodicamente difundido para todos os nós na forma de LSAs (*Link State Advertisement*). Esta informação de estado é usada como entrada de um algoritmo de cálculo de via usual ou que se baseia em restrição para cálculo de vias sujeitas à topologia, recursos e restrições administrativas.

O padrão GMPLS não determina nem impõe qualquer tipo de método de roteamento para permitir a diferenciação de implementação entre os fabricantes [3].

A figura 3.3, baseada em [4], dá uma visão geral sobre os processos de roteamento de *lightpath* e de sinalização, utilizando vários blocos de construção do plano de controle do GMPLS. A figura mostra que após a troca de informações sobre topologia e recursos utilizando-se o protocolo de roteamento, o cálculo de via óptica baseada em restrição através de um algoritmo RWA é, então utilizado para selecionar *lightpaths* sujeitos aos recursos especificados e/ou às restrições de política.

O algoritmo para cálculo de via óptica baseada em restrição faz uso das informações de topologia e de recursos que estão armazenadas na base de dados LSA/TE.

Após um *lightpath* ser selecionado, o protocolo de sinalização (RSVP-TE ou CR-LDP) é, então, convocado para estabelecer a conexão.

O seletor de *lightpath* na figura 3.2 calcula um ou diversos *lightpaths* para uma dada requisição de conexão com o objetivo de otimizar certos parâmetros de rede.

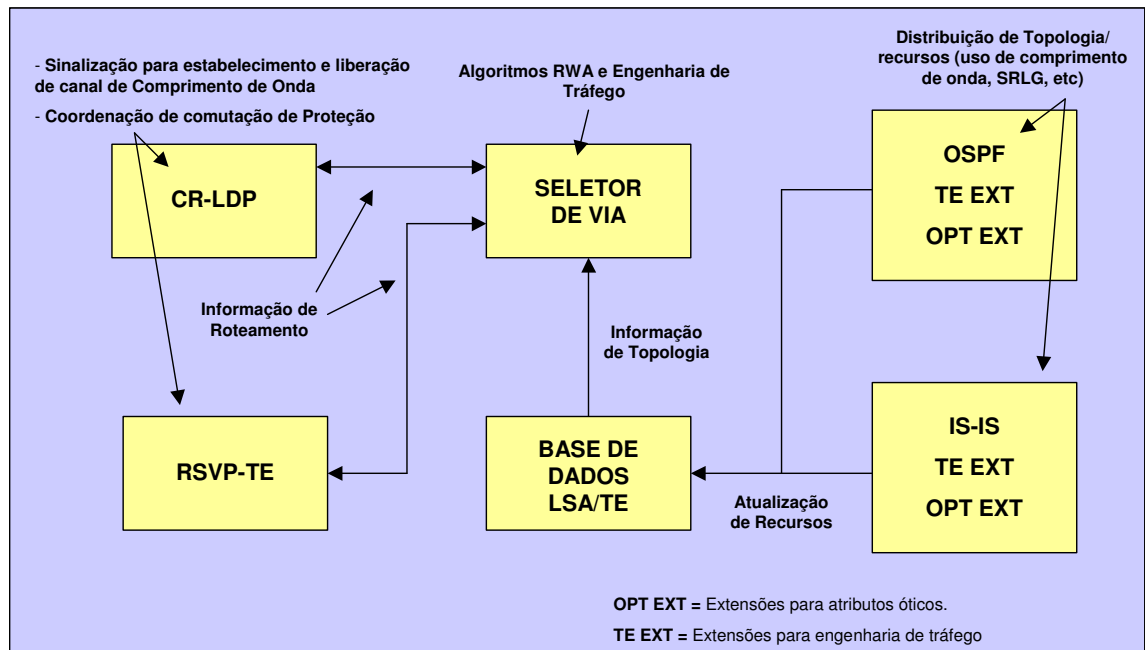


Figura 3.2 - Blocos de construção do GMPLS para roteamento óptico [4].

Vale salientar que enquanto o foco atual no IETF está em alguns protocolos específicos, o GMPLS por si só não está restrito a qualquer protocolo de roteamento ou sinalização. Além disso, protocolos tais como o OSPF, CR-LDP e RSVP-TE são flexíveis e podem ser utilizados na implementação de vários esquemas de roteamento e de sinalização para estabelecimento do comprimento de onda [4].

### 3.3.1. Extensões para o GMPLS

Como se pôde verificar no capítulo anterior, o problema RWA dentro de uma rede totalmente ótica traz questões muito complexas para serem resolvidas. Vários estudos têm sido realizados para resolver o problema RWA e vários esquemas são propostos para as mais diversas situações. Porém, não há um acordo sobre qual seria a melhor solução, nem há uma recomendação prática para sua implementação [3].

A estrutura proposta pelo GMPLS é imensa e tenta padronizar um modo de resolução do problema geral de estabelecimento dinâmico de *lightpath* em IONs. O

problema RWA aparece como uma parte relativamente pequena dentro da estrutura GMPLS, embora muito crítica.

Katz e Kompella [15, 16] apresentam as extensões dos protocolos de roteamento para o GMPLS. Tal verificação permite entender como a estrutura GMPLS pode estabelecer um *lightpath* dinamicamente na ION utilizando as extensões propostas até o momento pelo IETF e como os recursos ópticos podem ser divulgados e tratados nos LSRs.

### 3.4. Cálculo de *Lightpath* - Questões e Desafios

O cálculo de *lightpath* difere do cálculo de via genérico do IP em três aspectos importantes.

Primeiro, um *lightpath* é determinado não somente pelos nós e fibras ópticas atravessados pelo mesmo, mas também pelo comprimento de onda (canal) designado ao longo de cada enlace óptico. Quando se trata da designação de comprimentos de onda, deve-se assegurar que os *lightpaths* usem diferentes comprimentos de onda ao longo de um enlace de fibra compartilhada (isto é, restrição de comprimento de onda, como já comentado).

Em segundo lugar, o cálculo de *lightpath* deve considerar várias restrições da camada física para determinar um comprimento de onda válido.

Como discutido no capítulo 2, as tecnologias de comutação e transporte ópticas introduzem vários atributos e restrições. Por exemplo, o ASE diminui o número de amplificadores ópticos que um *lightpath* pode atravessar. Portanto, um *lightpath* logicamente legítimo pode ser particionado em duas ou mais sub-conexões com regeneração óptico-eletrônica em suas extremidades, devido às restrições da camada física, criando sub-domínios ópticos [5].

Em terceiro lugar, cada especificação explícita de *lightpath* inclui todos os nós, portas e comprimentos de onda ao longo da rota escolhida, tal que um protocolo de sinalização possa provisionar a conexão. Em adição, considerando a proteção e a restauração de *lightpath*, o cálculo deve produzir diversas rotas que minimizem a vulnerabilidade compartilhada.

A necessidade de conhecimento global dos recursos da rede traz problemas de escalabilidade, aumentando enormemente as tabelas de roteamento. Uma solução neste

caso seria o agrupamento de enlaces, embora isso cause perda de informação na camada óptica. Para resolver isso, utiliza-se o protocolo LMP do GMPLS, que permite o gerenciamento dos enlaces [5].

Todos os novos requisitos aqui mencionados tornam o cálculo de *lightpath* mais desafiador que o roteamento IP.

### 3.5. Arquiteturas Ópticas para o GMPLS

Supondo-se que o tráfego de dados orientado a pacotes e a quadros (*frames*), em particular, IP/MPLS e Ethernet, sejam os únicos tráfegos de clientes das redes ópticas em malha, seus respectivos planos de controle poderiam agir como pares, de tal modo que um único plano de controle seja processado sobre ambos domínios: óptico e IP/MPLS. Tal integração melhoraria enormemente não apenas a eficiência de utilização dos recursos da rede, mas também facilitaria enormemente o desenvolvimento de uma infra-estrutura de cross-conexão óptica no atual ambiente Internet.

A necessidade de melhor integração na camada de transporte conduziu à noção de um plano de controle pacote-óptico integrado (também referido como um modelo *peer-to-peer* de interconexão do plano de controle) para redes ópticas em malha IP/MPLS, com a finalidade de habilitar o desenvolvimento de engenharia de tráfego multicamada e recuperação de falhas [10]. Em busca desta integração, dois modelos para a Internet óptica, chamados *peer-to-peer* e *overlay*, foram propostos.

No modelo *peer-to-peer*, os *switches* ópticos e os roteadores agem como pares, utilizando um plano de controle unificado e uniforme para estabelecer LSPs através destes dispositivos com conhecimento completo dos recursos da rede.

Neste modelo há alguma ou nenhuma distinção entre interfaces UNI (*user-network interface*), NNI (*network-network interface*) e planos de controle roteador-roteador (MPLS); todos elementos de rede são pares diretos e dividem totalmente a topologia e os recursos.

No modelo *peer-to-peer* uma única instância de um plano de controle pode utilizar múltiplas tecnologias/elementos de rede. Isso permite a um operador de rede criar um único domínio composto de diferentes elementos, permitindo maior flexibilidade. Neste modelo, portanto, a topologia do *core* é conhecida pelos elementos de borda.

Para permitir que as redes de transporte legadas evoluam progressivamente para o modelo *peer-to-peer*, passos de migração intermediária foram considerados sob um modelo intermediário chamado *overlay*.

No modelo *overlay*, a rede óptica provê serviços de conexão para roteadores IP e para outros dispositivos de clientes conectados a ela. Camadas diferentes da rede permanecem isoladas umas das outras, mas o provisionamento dinâmico de largura de banda é possível.

Roteadores ou *switches* fazem a requisição de recursos à rede óptica para uma conexão e a rede pode aceitá-la ou negá-la. Estas requisições podem ser bem sofisticadas, solicitando um determinado circuito e com garantia de um determinado tipo de restauração.

O que caracteriza este modelo é que os dispositivos que fazem a requisição, não podem ver o interior da rede, ou seja, o modelo *overlay* esconde os detalhes da rede óptica interna o que resulta em dois planos de controle separados com mínima interação entre eles. Um plano de controle opera dentro da rede óptica principal (*core*) e o outro entre esta e os elementos de borda que o circundam (utilizando UNI). Os elementos de borda suportam vias ópticas que são sinalizadas dinamicamente através da rede *core* ou provisionadas estaticamente sem conhecimento da topologia interior da rede.

Este modelo é muito similar às redes IP/ATM atuais e impõe controles administrativos nas bordas.

Os sistemas ópticos de terceira geração [23] têm uma forte afinidade com o modelo *overlay* e a maioria das atividades de padronização do GMPLS indica que este modelo será implementado primeiro [10].

Funcionalmente, o conjunto de funções requeridas para suportar o modelo *overlay* é um subconjunto das funções necessárias para suportar o modelo *peer-to-peer*. Isso significa que os dispositivos podem suportar os dois modelos, permitindo maior flexibilidade às operadoras.

A figura 3.3 ilustra as duas arquiteturas ópticas, *overlay* e *peer-to-peer*, propostas para o GMPLS.



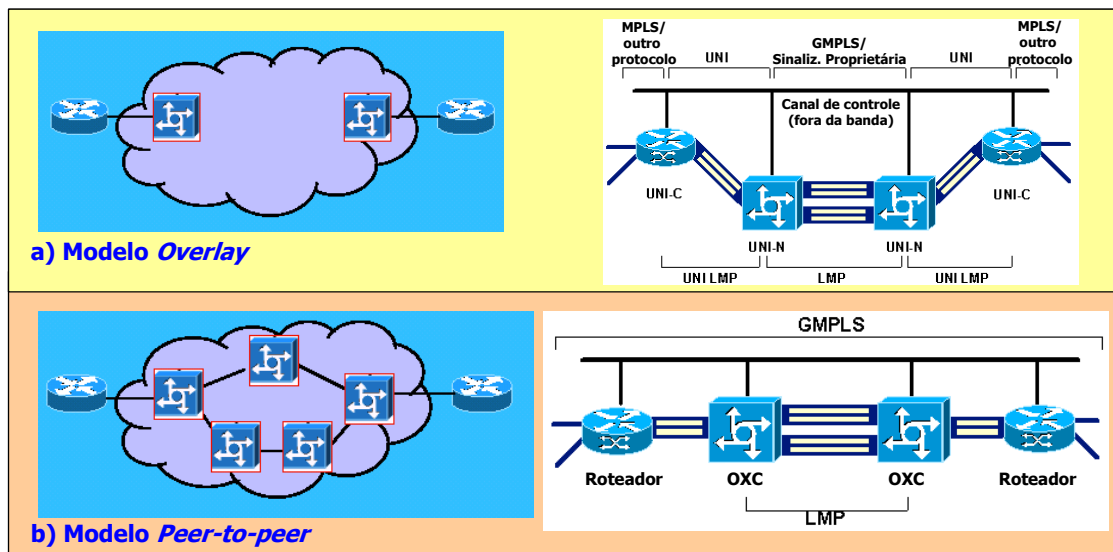


Figura 3.3 - Arquiteturas Ópticas *Overlay* e *Peer-to-peer* para o GMPLS [1].

Entre estes dois modelos primários, há outro modelo proposto chamado “*augmented*”, que pode ser considerado como intermediário entre os modelos *overlay* e *peer-to-peer* [5].

Embora mais caracterizado que o *overlay*, o modelo “*augmented*” permite apenas a troca de um montante limitado de informação de roteamento entre o cliente IP/MPLS e a rede de transporte óptica que funciona como servidor.

A principal diferença entre os modelos *peer-to-peer* e *augmented* é que, no primeiro, informações completas de roteamento (ex. engenharia de tráfego) são trocadas entre o IP/MPLS e a rede de transporte do plano de controle, enquanto no último, somente um montante limitado de informação de roteamento (principalmente alcançabilidade) pode ser trocado entre os nós de borda dos clientes [10].

Outra diferença entre estes modelos está nos esquemas de endereçamento utilizados. No modelo *peer-to-peer* os nós SDH/SONET, como roteadores, são dispositivos endereçáveis por IP. O modelo *augmented* permite, mas não obriga, total ou parcial opacidade do espaço de endereçamento da rede de transporte e da topologia.

Mais detalhes sobre as especificações do GMPLS e sua relação com o roteamento óptico podem ser encontrados nas referências [9-20].

### 3.6. Conclusão

Conforme apresentado neste capítulo, o GMPLS é um plano de controle completo baseado no MPLS, com protocolos de roteamento, sinalização e gerenciamento de enlace que permitem estabelecer uma via fim-a-fim de maneira hierárquica incluindo o roteamento sobre uma rede totalmente óptica.

O GMPLS prevê o roteamento dinâmico de lambdas para estabelecimento e liberação de vias fim-a-fim.

O GMPLS deverá atuar sobre uma rede totalmente óptica e utilizará algoritmos RWA para cálculo do *lightpath* e designação automática do par rota/comprimento de onda, atendendo às requisições de conexão.

Mecanismos de proteção e restauração são previstos na estrutura do GMPLS para prover confiabilidade à rede e garantir o restabelecimento das rotas de maneira automática.

O dimensionamento de uma rede GMPLS atuando sobre uma rede totalmente óptica constitui-se em um novo problema que exige critérios bem definidos para sua solução, como será apresentado no próximo capítulo.

#### 4. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Conforme definido nos capítulos 2 e 3, o roteamento numa rede totalmente óptica é uma das questões críticas de uma rede GMPLS.

A solução do problema RWA possui vários aspectos a serem considerados para que uma rede GMPLS possa atender aos novos serviços com qualidade.

Como comentado, a tendência é que as redes trabalhem com tráfego dinâmico no domínio óptico, onde as conexões são estabelecidas e liberadas, conforme as requisições cheguem aos nós.

As restrições da rede em termos de topologia, número de enlaces, disponibilidade de lambdas, distância entre os nós, limites da camada óptica e utilização de conversores de comprimento de onda, precisam ser consideradas para que as rotas possam ser estabelecidas, diminuindo ao máximo o bloqueio de conexões, permitindo um desempenho satisfatório.

Dentro deste contexto, dimensionar uma rede GMPLS com tais características torna-se um desafio.

Normalmente, os problemas da camada óptica e suas limitações (ASE, PMD, dispersão, atenuação, etc) não são considerados para facilitar a análise da rede totalmente óptica, mas deverão ser previstos tanto no projeto, como nos parâmetros a serem divulgados nas mensagens de controle [5].

Para que seja possível analisar o comportamento da rede e seu desempenho quanto ao limite de carga em relação ao bloqueio e a taxa de falhas numa rede totalmente óptica, pode-se efetuar simulações com algoritmos RWA como citado no capítulo 2.

Com base nisso, o trabalho aqui proposto visa demonstrar como estas simulações podem auxiliar no dimensionamento de uma rede GMPLS, determinando-se a carga suportada por determinada topologia e quantidade de recursos, verificando-se e mensurando o ganho obtido com o acréscimo de interconexões e de comprimentos de onda. Além disso, investiga-se como a taxa de falhas em enlaces e roteadores afeta e limita o desempenho da rede. É também verificado se a utilização de diferentes tipos de algoritmo RWA pode economizar recursos, permitindo que a rede suporte um tráfego dinâmico maior sem que ela tenha que ser expandida.

A principal finalidade do dimensionamento da rede é obter o menor bloqueio possível com o mínimo de comprimentos de onda, já que isso representa investimento alto em equipamentos para cada nó.

Para isso, busca-se nas simulações o limite de carga suportado para cada comprimento de onda, admitindo-se um limite máximo de bloqueio de conexões, verificando-se quais são as melhores condições da rede para que este limite não seja ultrapassado.

Para este estudo, são realizadas simulações, utilizando-se topologias previstas para a rede GMPLS experimental Kyatera e suas expansões, como explicado adiante. Não se pretende apenas analisar esta rede, mas principalmente demonstrar um critério dimensionamento de redes totalmente óticas.

Este capítulo tem, portanto, os objetivos de apresentar a rede GMPLS KyaTera, sua estrutura, as topologias que foram adotadas e os algoritmos RWA utilizados. Também são definidos o problema a ser tratado e os parâmetros considerados nas simulações. É apresentado ainda o simulador adotado e os tipos de simulações propostas para o dimensionamento da rede e sua análise.

#### 4.1. O Projeto Kyatera

De modo a analisar como o bloqueio de *lightpaths* afeta o dimensionamento de uma rede GMPLS e com a finalidade de obter o menor número de comprimentos de onda, foi realizado um estudo tomando como base duas topologias previstas para a rede GMPLS KyaTera.

O projeto KyaTera faz parte do **TIDIA** (Tecnologia da Informação no Desenvolvimento da Internet Avançada), um programa de financiamento da Fapesp (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) criado especialmente para projetos cooperativos de alto impacto em tecnologias da informação e de comunicações.

KyaTera é um projeto cooperativo para o estudo de tecnologias da Internet avançada. Uma rede de fibras ópticas interliga todos os laboratórios das universidades participantes, possibilitando a demonstração experimental e a aplicação das tecnologias propostas.

A rede KyaTera é, essencialmente, um laboratório geograficamente distribuído no qual a comunidade acadêmica do Estado de São Paulo pode desenvolver aplicações de

Internet avançada, bem como testar em campo equipamentos e componentes ópticos, realizando pesquisa básica e aplicada em transmissão óptica e tecnologias de rede.

A rede KyaTera é uma rede GMPLS de pesquisa que possivelmente será implementada em três fases (com três nós, cinco nós e finalmente oito ou nove nós – a ser definido), conectando várias universidades no Estado de São Paulo.

Os nós principais estarão localizados nas seguintes cidades: São Paulo, Campinas, São Carlos, Ribeirão Preto, São José dos Campos, Santos, Bauru e Rio Claro, como mostra a figura 4.1. Há estudos para se chegar até o nono nó localizado na cidade de São José Rio Preto. A fase I do projeto conta com a implementação já realizada da infra-estrutura física entre São Paulo, Campinas e São Carlos. As duas outras fases ainda estão em planejamento.



**Figura 4.1 - Futura Rede KyaTera interconectando universidades do Estado de São Paulo.**

Será possível a interconexão dos nós através de pelo menos um par de fibras ópticas, viabilizando a implementação de diferentes topologias. Admite-se que os nós de São Paulo, São Carlos e Campinas, que constituem o núcleo da rede, poderão, na fase III de expansão, conectar-se fisicamente a qualquer outro nó, utilizando os nós deste núcleo

como passagem (*bypass*). Os equipamentos serão dimensionados de modo a vencer as distâncias entre estas cidades e as restrições da camada óptica.

#### 4.2. Descrição da Rede Kyatera

A rede KyaTera utiliza cabos ópticos (de 24 e 36 fibras padrão G.652) que chegam diretamente aos laboratórios (*fiber-to-the-lab*). Esses laboratórios estão interconectados através de várias redes para diferentes objetivos de pesquisa.

Os nós principais em cada cidade deverão conter equipamentos comutadores ópticos (OXC) para roteamento de comprimento de onda, DWDM para multiplexação de lambdas na mesma fibra e roteador GMPLS.

O plano de controle será totalmente independente do plano de dados, implementado com canais fora da banda (*out-of-band*).

É considerado o modelo *peer-to-peer* na construção da rede KyaTera, permitindo total integração entre os domínios IP e óptico.

O sistema DWDM a ser utilizado nos nós terá um número inicial de quatro lambdas, podendo chegar a quarenta lambdas na configuração final, conforme a grade proposta pelo ITU-T para a banda C (1550nm).

O sistema OXC utilizado não admite conversores de comprimento de onda, mas os mesmos poderão ser utilizados externamente em alguns pontos de concentração de tráfego da rede. Isso também faz parte de estudo futuro.

O crescimento e expansão da rede requer estudos sobre seu desempenho em relação à carga de tráfego e em eventuais condições de falha. Como isso representa investimento, um estudo que mostre de modo prático quando será necessário acrescentar recursos à rede, é de grande valia.

Com a avaliação do desempenho da rede, relacionando a carga com o bloqueio de conexões para uma quantidade crescente de lambdas, pode-se determinar e estimar o momento correto de prover a expansão da rede, acrescentando-se mais um comprimento de onda ou alterando-se sua topologia.

Avaliar o desempenho da rede Kyatera é item fundamental para prever corretamente sua evolução e seu dimensionamento.

No estudo aqui proposto, foram utilizadas as topologias I e II ilustradas nas figuras 4.2 e 4.3, referentes respectivamente às fases I e à possível fase III do projeto, com a

finalidade de comparar o desempenho das mesmas e de obter a quantidade mínima de lambdas para um mínimo de bloqueio em cada uma delas. O estudo visa ao dimensionamento de recursos para cada fase conforme o aumento do tráfego dinâmico da rede.

A topologia I utiliza um mínimo de conexões físicas entre os nós, constituindo uma solução econômica.

Na topologia II, os nós, que formam o núcleo da rede (São Paulo, São Carlos e Campinas), conectam-se a todos os demais nós da rede através de um par de fibras ópticas (os cabos ópticos já implantados possuem fibras ópticas disponíveis para isso). Esta é uma topologia em malha, que visa à maior confiabilidade da rede e dos serviços.

Para cada topologia, verifica-se o comportamento da rede Kyatera com a carga de tráfego na presença de falhas nos nós e nos enlaces. Para isso, são analisados o bloqueio de conexões e sua variação com o número de lambdas por fibra nestas condições. Considera-se que, na ocorrência de uma falha, uma nova rota será determinada para um *lightpath* e caso não seja encontrada, a conexão será bloqueada.

Baseado em [3], tomou-se como referência de bloqueio de conexões uma taxa máxima de 5%. Considera-se que a taxa de bloqueio é alta, quando estiver acima deste valor. Este limite é tomado como referência para estudo do planejamento da expansão da rede Kyatera e para análise do desempenho da mesma. Esta análise também considera a taxa de falhas nos nós e nos enlaces.

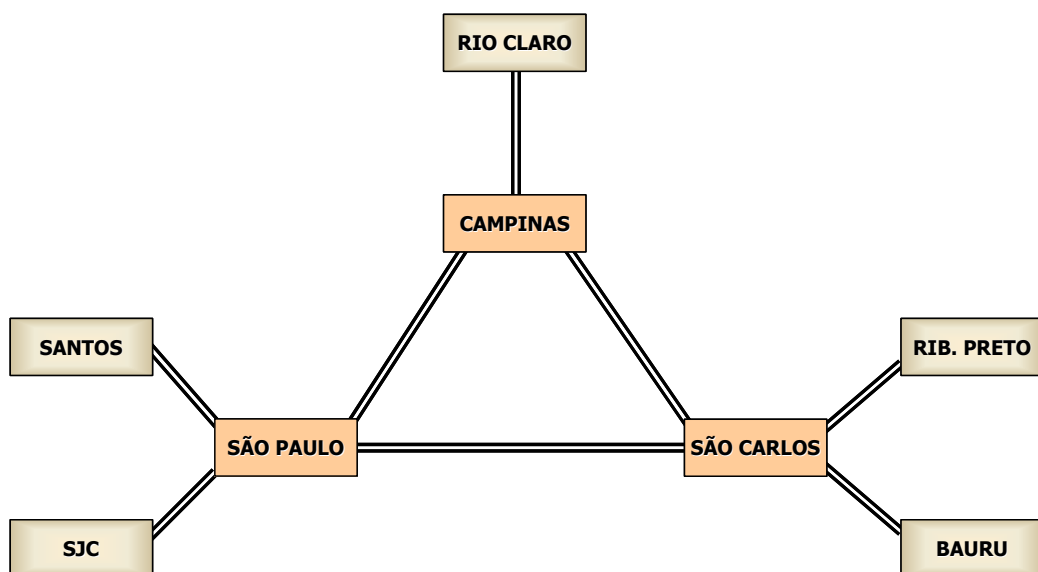


Figura 4.2 - Rede KyaTera – Topologia I.

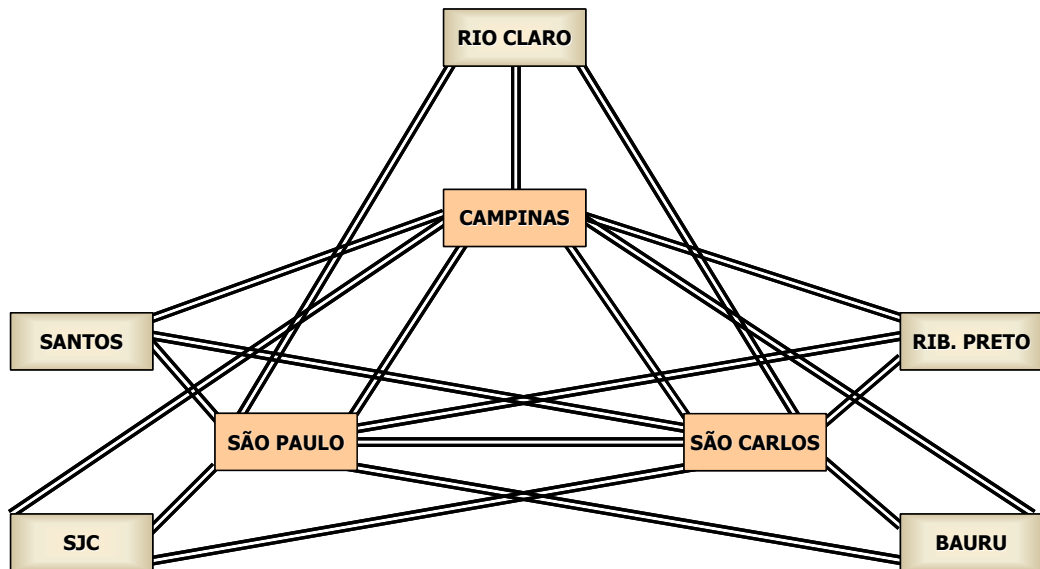


Figura 4.3 - Rede KyaTera - Topologia II.

#### 4.3. Descrição do Simulador

Na realização dos estudos e análises propostos, utilizou-se o simulador *Optical Network Simulation System* desenvolvido por Koçyiğit [22] para efetuar a análise de redes totalmente ópticas, considerando-se falhas nos roteadores e enlaces ópticos e determinando-se as rotas mais confiáveis.

Este simulador foi escolhido porque permite a utilização e comparação de vários algoritmos RWA (tanto fixo-alternados como adaptativos), a alteração das características físicas da rede (topologia, número de lambdas por fibra, carga total na rede, carga por nó e por comprimento de onda), medindo o bloqueio de conexões e a probabilidade de reconfiguração de *lightpaths* conforme o aumento da carga e da taxa de elementos não confiáveis.

O simulador considera o estabelecimento dinâmico de conexões (caso DLE), sendo que os lambdas são tomados e liberados conforme as requisições de conexão chegam aos nós.

Dois modos distintos de simulação podem ser selecionados:

- a. Taxa de elementos não confiáveis fixa e carga de tráfego variável;
- b. Taxa de elementos não confiáveis variável e carga de tráfego fixa.



Os valores fixos de carga e de elementos não confiáveis podem ser programados no simulador, em cada modo selecionado.

Os limites máximos de carga ou de taxa de falhas (dependendo do modo em que o simulador está trabalhando) podem ser programados, assim como seus valores de início e o passo incremental utilizado nas simulações.

Como saída, o simulador fornece os seguintes gráficos, dependendo do modo de simulação que foi selecionado:

- a) variação da probabilidade de bloqueio com a carga ou com a taxa de elementos não confiáveis na rede;
- b) variação da probabilidade de reconfiguração com a carga ou com a taxa de elementos não confiáveis na rede;
- c) a variação da ocupação com a carga ou com a taxa de elementos não confiáveis.

A carga de tráfego na rede é expressa em Erlangs, sendo calculada como a taxa de chegada de requisições multiplicada pelo tempo médio de retenção das conexões. Cada requisição faz com que o simulador determine uma rota e um comprimento de onda para estabelecimento da conexão.

Os seguintes algoritmos RWA podem ser selecionados para cada simulação: **AUR**, **LLR**, **Alt**, **MCR** e **MRPR**. Estes algoritmos já foram descritos no capítulo 2.

Conversores podem ou não ser utilizados nas simulações, dependendo da programação. Os algoritmos recebem no simulador o prefixo **WI** quando são utilizados conversores e o prefixo **WS** quando não são utilizados. O número de conversores pode ser programado para cada nó.

Para algoritmos RWA que utilizam roteamento fixo-alternado (**Alt**), o número de rotas alternativas pode ser programado.

O número de fibras por enlace e o número de lambdas por fibra podem ser programados, sendo que o número especificado é utilizado para todos os enlaces da rede.

Os enlaces podem ser programados como uni ou bidirecionais, sendo a programação válida para todos os enlaces.

A quantidade de roteadores/enlaces não confiáveis existentes na rede (chamado *Failure Dist.*) pode ser programada, sendo usada como parâmetro do simulador para análise do bloqueio e da probabilidade de reconfiguração.

As taxas de falhas nos roteadores/enlaces também podem ser programadas. Para isso, consideram-se duas classes de roteadores/enlaces: confiáveis e não confiáveis. Ambos podem falhar, mas com probabilidades diferentes. A taxa de falhas dos elementos confiáveis é chamada de **Failure Rate (Low)** e a taxa dos elementos não confiáveis é chamada de **Failure Rate (High)**.

Se um roteador ou enlace falha, os *lightpaths* deste roteador ou enlace são reroteados numa via de restauração. Nas simulações, assume-se que uma via de restauração é encontrada para cada *lightpath* quando ocorre uma falha. Os *lightpaths* que não puderem ser roteados (ou reroteados) são assumidos como bloqueados e perdidos.

O simulador considera que a informação global do estado da rede é precisa e sempre está atualizada em cada nó.

#### 4.3.1. Algoritmos RWA utilizados no Simulador

Conforme apresentado no capítulo 2, muitos algoritmos RWA têm sido propostos para solução do problema de roteamento óptico e toda uma teoria foi desenvolvida e pesquisada em busca de algoritmos adequados a cada condição de rede.

Nas simulações realizadas neste trabalho, foram utilizados algoritmos que consideram o menor número de *hops*, o número de vias alternativas, as vias menos congestionadas e as vias com menor probabilidade de reconfiguração. Essas são algumas opções para utilização nas redes GMPLS [3, 4, 6, 22], conforme já explicado. Não se considera o uso de conversores na rede Kyatera, sendo utilizado, portanto, apenas algoritmos do tipo **WS**.

Os algoritmos utilizados no simulador adotado já foram descritos no capítulo 2, mas são aqui resumidos para uma rápida referência:

- **wsAUR [28]**: uma versão estendida do roteamento adaptativo irrestrito (*Adaptive Unconstraint Routing*) para selecionar a via, utilizando o número mínimo de *hops* entre os roteadores fonte e destino. Utiliza *link state* para seleção de rota e *first-fit* para seleção de lambda.

- **wsMRPR [22]:** algoritmo com mínima probabilidade de reconfiguração (*Minimum Reconfiguration Probability Routing*). Similar ao wsAUR, mas leva em conta as estatísticas de falhas dos enlaces e dos roteadores da rede, selecionando as rotas mais confiáveis.
- **wsAlt [23]:** algoritmo restrito com roteamento do tipo fixo-alternado (*Alternate*) e com seleção de lambda do tipo *first-fit*.
- **wsLLR [29]:** algoritmo adaptativo com roteamento fixo-alternado, que seleciona a via menos congestionada (*Least-Loaded Routing*) entre as rotas mais curtas e utiliza seleção de lambda do tipo *Most-used*.
- **wsAltMCR [30]:** algoritmo similar ao algoritmo LLR, que seleciona a via menos congestionada (*minimum congested routing*), mas independente de ser a mais curta. Utiliza heurística *first-fit* para designação de comprimento de onda.
- **wsAltMRPR [22]:** Adaptação do algoritmo MRPR para roteamento fixo-alternado.

O simulador não permite que outros algoritmos além destes sejam utilizados ou incluídos. Também não é possível alterar o tipo de heurística WA utilizada nos algoritmos.

#### 4.3.2. Definições

As seguintes definições utilizadas pelo simulador são importantes para o melhor entendimento das simulações, dos parâmetros utilizados e dos resultados obtidos:

- As requisições de *lightpath* chegam a cada nó de acordo com o processo de Poisson com uma taxa  $\lambda_r$ .
- O nó de destino é selecionado aleatoriamente e o tempo de retenção de cada *lightpath* é exponencialmente distribuído (média = 1).
- A carga total oferecida à rede é definida como sendo [7]:

$$\lambda_T = \lambda_r NH / \mu LCF$$

onde  $\lambda_r$  é a taxa de requisição de conexões,  $N$  é o número de nós fonte,  $H$  é o número médio de *hops* por fluxo (considerando todos os pares fonte-destino)

entre os nós,  $\mu$  é o inverso do tempo de retenção das conexões,  $L$  é o número de enlaces,  $C$  é o número de comprimentos de onda de cada fibra e  $F$  é o número de fibras em cada enlace.

- Probabilidade de Bloqueio = probabilidade de uma requisição de *lightpath* ser bloqueada na rede.
- Confiabilidade (*reliability* no simulador) = (número de roteadores e enlaces não confiáveis)/(número total de roteadores e enlaces da rede).
- Probabilidade de Reconfiguração = probabilidade de um *lightpath* ser reconfigurado devido à falha num roteador ou num enlace ao longo da via.

O simulador supõe que os enlaces e roteadores falham de acordo com o processo de Poisson com taxa de  $\lambda_f$  e que os tempos de retenção de falha são exponencialmente distribuídos com valor médio de  $1/(10\lambda_f)$ . O parâmetro  $\lambda_f$  pode ser programado no simulador.

#### 4.4. Condições de Simulação

Com a finalidade de verificar o desempenho da rede Kyatera quanto ao bloqueio e à taxa de elementos não confiáveis, determinando-se os limites de carga e o número de lambdas necessários, foram adotadas algumas condições de simulação para restringir a análise aos objetivos pretendidos.

Nas simulações, foi considerado que todos os enlaces são bidirecionais, assim como os *lightpaths* estabelecidos.

A carga utilizada foi a carga total da rede, como em [7, 8, 28 e 31], sendo que a mesma foi selecionada de acordo com o tipo de topologia, com a finalidade de analisar a capacidade máxima da rede e as condições para que o bloqueio ficasse abaixo de 5%.

Não foram utilizados algoritmos com roteamento fixo nas simulações. São utilizados somente algoritmos de roteamento do tipo fixo-alternado e adaptativo. A rede foi analisada para uma e três rotas alternativas, utilizadas para os algoritmos do tipo fixo-alternado.

Não foi considerado o uso de conversores de comprimento de onda na rede, portanto os algoritmos selecionados são todos do tipo *WS* (*wavelength selective*).

Cada algoritmo utiliza seu próprio critério para designação de comprimento de onda, conforme já explicado.

O algoritmo RWA **wsAUR** é utilizado como algoritmo de referência na maioria das simulações por ser um algoritmo adaptativo irrestrito que busca todos os caminhos possíveis na rede e que considera os caminhos mais curtos, sendo utilizado como referência também em outras pesquisas [22, 28].

Não são consideradas restrições da camada física como atenuação, dispersão, ASE, PMD, etc., que serão tratadas no projeto da rede, utilizando-se os devidos equipamentos para amplificação e compensação da degradação do sinal óptico.

Foi adotado que o tráfego é uniformemente distribuído entre todos os pares de nós e que o tempo de processamento nos mesmos é desprezível.

Todos os resultados foram obtidos com um nível de confiança de 95% e um intervalo de confiança de 5%, como adotado em [7].

#### 4.5. Descrição do Problema

Conforme descrito, a rede KyaTera deverá ser expandida, passando pelas fases I, II e III. Sendo uma rede GMPLS que deve estabelecer *lightpaths* entre todas as localidades envolvidas e que deve operar com tráfego dinâmico (DLE), as seguintes questões devem ser respondidas para que seja possível prever seu dimensionamento:

- a) qual a carga total admissível para que a rede Kyatera apresente uma probabilidade de bloqueio de conexões máxima de 5% nas topologias I e II para diferentes quantidades de lambdas por fibra ?
- b) a partir de qual carga se faz necessário o acréscimo de mais um lambda na rede em cada topologia ?
- c) qual a carga incremental suportada pela adição de mais um lambda na rede nas topologias I e II ?
- d) qual a relação entre o crescimento da carga e o número de lambdas a ser utilizado na rede Kyatera num ambiente com tráfego dinâmico?
- e) qual a relação entre a taxa de falhas dos nós e enlaces e o número de lambdas utilizados para a carga de trabalho nas topologias I e II da rede KyaTera ?

- f) a utilização de diferentes algoritmos RWA afeta a probabilidade de bloqueio de conexões nas duas topologias, considerando-se a existência de elementos não confiáveis na rede ?
- g) que tipo de algoritmo RWA possui melhor desempenho na rede KyaTera e favorece uma menor utilização de recursos ?
- h) como simulações com algoritmos RWA contribuem para o dimensionamento de uma rede GMPLS ?

Para responder a estas questões a partir da obtenção de dados práticos e com o objetivo de prever o dimensionamento da rede KyaTera, realizou-se o estudo aqui apresentado, dividido em duas partes:

**I) Simulação com base na variação da carga na rede:** foram realizadas simulações da variação da carga x bloqueio de conexões, fixando-se as taxas de falhas para elementos não confiáveis e confiáveis em 1/100 (1%) e 1/10000 (0,01%) respectivamente e considerando-se que 10% dos roteadores e enlaces não são confiáveis. Estes são os limites baseados nas simulações em [22]. Apenas para a taxa de elementos não confiáveis foi selecionado um valor maior para evidenciar o efeito da utilização de elementos não confiáveis com maior probabilidade de falha.

Foram realizadas simulações que consideraram uma expansão de 4 até 40 lambdas, verificando-se:

- a) a carga suportada na rede Kyatera para um limite de 5% de bloqueio;
- b) a variação do item a com o aumento de número de lambdas na rede;
- c) a diferença de desempenho dos itens a e b para as topologias I e II;
- d) a variação de desempenho para diferentes tipos de algoritmos RWA e uma rota alternativa, utilizando-se 4 lambdas e carga total para bloqueio máximo de 5%;
- e) a mesma análise do item anterior para três rotas alternativas.

**II) Simulação com base na taxa de elementos não confiáveis na rede:** foram realizadas simulações da variação da taxa de elementos não confiáveis x bloqueio de conexões, considerando-se uma carga fixa na rede. Foram realizadas simulações,

considerando-se uma expansão de 4 até 40 lambdas e cargas fixas que limitem o bloqueio em 5% para cada simulação, verificando-se:

- a) a relação entre a probabilidade de falha dos elementos não confiáveis e o bloqueio de conexões;
- b) a relação entre o aumento da taxa de elementos não confiáveis na rede e o bloqueio de conexões;
- c) a variação do item b com o aumento do número de lambdas na rede;
- d) a diferença de desempenho dos itens b e c para as topologias I e II da rede KyaTera;
- e) a variação de desempenho para diferentes tipos de algoritmos RWA com uma rota alternativa e carga fixa para 5% de bloqueio;
- f) Idem ao item e, mas para três rotas alternativas.

#### 4.6. Conclusão

Neste capítulo foi apresentado em detalhes o problema que se deseja investigar.

Fica claro que há muitas questões a serem respondidas quando se deseja dimensionar uma rede totalmente óptica controlada pelo GMPLS. É necessário para isso estabelecer um critério para medida de desempenho, como por exemplo, o limite de 5% no bloqueio de conexões.

A utilização de simulações com diferentes algoritmos RWA é proposta como ferramenta de dimensionamento, utilizando como exemplo a rede Kyatera em duas topologias extremas (com poucas e muitas interconexões) para que se possa mensurar as diferenças de carga máxima, bloqueio de conexões e tolerância à falhas.

Os resultados obtidos destas simulações são apresentados e analisados no próximo capítulo.

## 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base nas definições listadas no capítulo anterior, são apresentados e analisados neste capítulo os resultados das simulações, visando à obtenção de dados práticos que auxiliem no dimensionamento da rede KyaTera. Conforme explicado, o estudo foi dividido em duas partes: primeiramente, analisou-se a variação do bloqueio de conexões com o aumento contínuo da carga e, em seguida, a carga foi mantida fixa em certos valores incrementando-se continuamente a taxa de elementos não confiáveis. A tabela 5.1 detalha esta divisão do trabalho e a análise realizada em cada parte.

**Tabela 5.1 - Relação de Simulações Efetuadas para Dimensionamento da Rede KyaTera.**

SIMULAÇÃO	PARÂMETRO FIXADO	PARÂMETRO VARIADO	ITEM	ANÁLISE
VARIÇÃO DO BLOQUEIO COM A CARGA TOTAL DE TRÁFEGO (item 5.1)	Taxa de Elementos não confiáveis na Rede (1/100)	Carga Total da Rede	5.1.1	Varição da Probabilidade de Bloqueio com o número de Lambdas nas Topologias I e II para análise dos limites de capacidade da rede.
			5.1.2	Valores máximos de carga total para que a probabilidade de bloqueio fique abaixo de 5% para cada número de Lambdas nas Topologias I e II.
			5.1.3	Comparação da variação da probabilidade de Bloqueio (na faixa de 5%) com a carga na rede para 4 lambdas e diferentes algoritmos RWA. Análise realizada para uma e três rotas alternativas, considerando-se 4 lambdas por fibra.
VARIÇÃO DO BLOQUEIO COM A TAXA DE ELEMENTOS NÃO CONFIÁVEIS (Item 5.2)	Carga Total da Rede (fixada para valores que permitam até 5% de bloqueio)	Probabilidade de falha dos elementos não confiáveis	5.2.1	Varição do Bloqueio (na faixa de 5%) com a probabilidade de falha dos elementos não confiáveis nas Topologias I e II.
		Taxa de Elementos não confiáveis na Rede	5.2.2	Varição do Bloqueio (na faixa de 5%) com o aumento da taxa de elementos não confiáveis e do número de lambdas nas Topologias I e II.
			5.2.3	Comparação da variação da probabilidade de Bloqueio (limitado a 5%) com a taxa de elementos não confiáveis para diferentes Algoritmos RWA. Análise realizada para uma e três rotas alternativas considerando-se 4 lambdas por fibra.



## 5.1. Análise da Variação do Bloqueio de Conexões com a Carga Total de Tráfego

Neste item analisa-se a variação do bloqueio de *lightpaths* com o aumento contínuo da carga total de tráfego na rede GMPLS KyaTera.

Esta análise foi realizada de três formas diferentes, com a finalidade de mensurar o efeito da adição de recursos e do tipo de algoritmo RWA selecionado no desempenho da rede quanto aos limites de carga e de bloqueio.

A primeira análise consiste em verificar os limites da rede quanto à capacidade de carga e do bloqueio de conexões para toda a faixa de comprimentos de onda prevista nas fases I a III (4 a 40 lambdas).

A segunda análise consiste em identificar os limites de carga para cada número de comprimentos de onda de modo a limitar o bloqueio em 5% em cada topologia.

Na terceira análise, verifica-se a influência dos diferentes tipos de algoritmos RWA no bloqueio de conexões, quando a carga total da rede é variada. Esta análise também se realiza na faixa de 5% de bloqueio para as topologias I e II utilizando 4 lambdas. Foram utilizadas primeiramente uma rota alternativa e em seguida três rotas alternativas, para que fosse possível comparar o desempenho dos algoritmos do tipo fixo-alternado.

Para estas três análises, os parâmetros de falha foram fixados no simulador nos seguintes valores:

- Porcentagem de elementos não confiáveis na rede (*Failure Dist.*) = 10%
- Taxa de falha de elementos não confiáveis (*Failure Rate High*) = 1/100
- Taxa de falha de elementos confiáveis (*Failure Rate Low*) = 1/10000

Os resultados de cada análise são apresentados nos próximos itens.

### 5.1.1. Variação do bloqueio de conexões com o número de lambdas

Nestas simulações, verifica-se a variação da probabilidade de bloqueio de conexões para um incremento contínuo da carga total da rede e do número de lambdas por fibra.

O número de comprimentos de onda na rede foi fixado para cada simulação nos seguintes valores e ordem: 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 30 e 40 lambdas por fibra. A probabilidade de bloqueio de conexões foi simulada para cada um destes valores nas

topologias I e II da rede KyaTera, visando a análise de sua variação com o número de lambdas e com a carga total de tráfego na rede, buscando seus limites.

A carga máxima de tráfego na rede foi a mesma para todas as simulações em cada topologia e foi estabelecida tomando-se como referência uma probabilidade de bloqueio de 5% para 40 lambdas. Portanto, em cada topologia, a carga para a qual o bloqueio de conexões com 40 lambdas ficou em 5%, foi adotada como a carga máxima da rede a ser utilizada nas simulações. Este valor de carga foi tomado como referência e utilizado para as simulações com as demais quantidades de lambdas na rede (entre 4 e 30).

Os valores obtidos e utilizados como referência de carga foram: 300 Erlangs para a topologia I e 1000 Erlangs para a topologia II. Para determinação destes valores máximos foram realizadas simulações com 40 lambdas nas topologias I e II, verificando-se o ponto do gráfico onde o bloqueio cruza a linha de 5%, considerada a região de interesse de estudo deste trabalho. Os valores máximos foram tomados um pouco acima deste ponto.

Os resultados das simulações neste item permitem comparar as topologias quanto ao desempenho da rede e também verificar o incremento de carga e bloqueio conforme a adição de lambdas. Com base nestes resultados, pode-se estimar os recursos necessários para atender ao aumento da demanda de tráfego e mensurar o efeito do aumento de interconexões no desempenho da rede, utilizando-se o mesmo número de equipamentos.

A seguinte configuração foi adotada para estas simulações:

- Algoritmo RWA: **wsAUR**.
- Carga total máxima: 300 Erlangs para a Topologia I e 1000 Erlangs para a Topologia II.

Os gráficos obtidos para as topologias I e II encontram-se nas figuras 5.1 e 5.2 respectivamente.

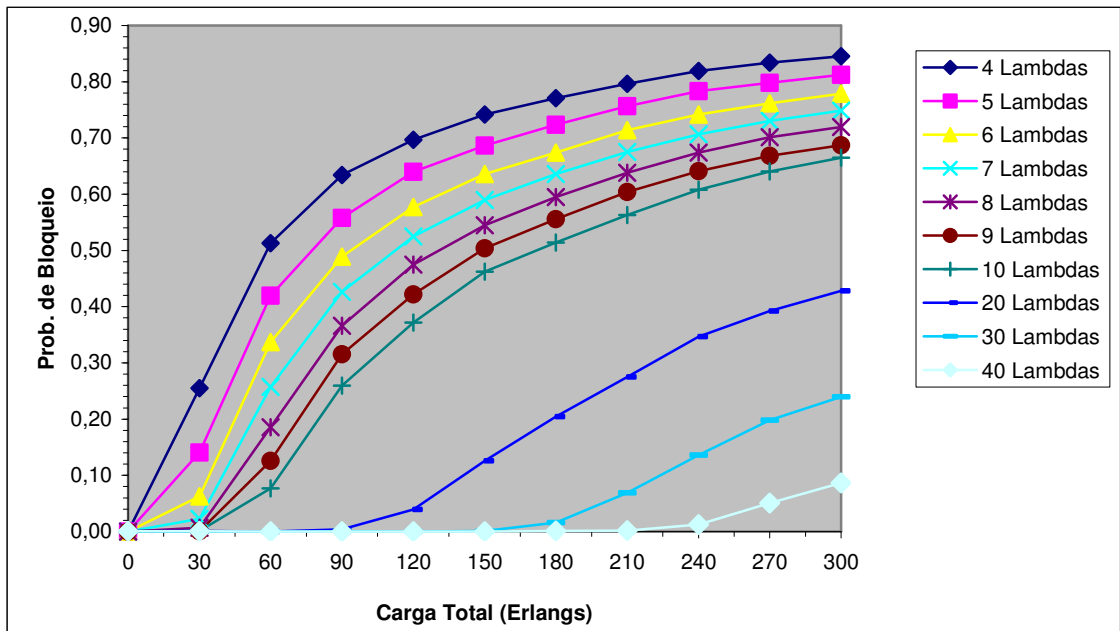


Figura 5.1 - Variação do Bloqueio de conexões com a Carga Total na Topologia I conforme o aumento do número de lambdas.

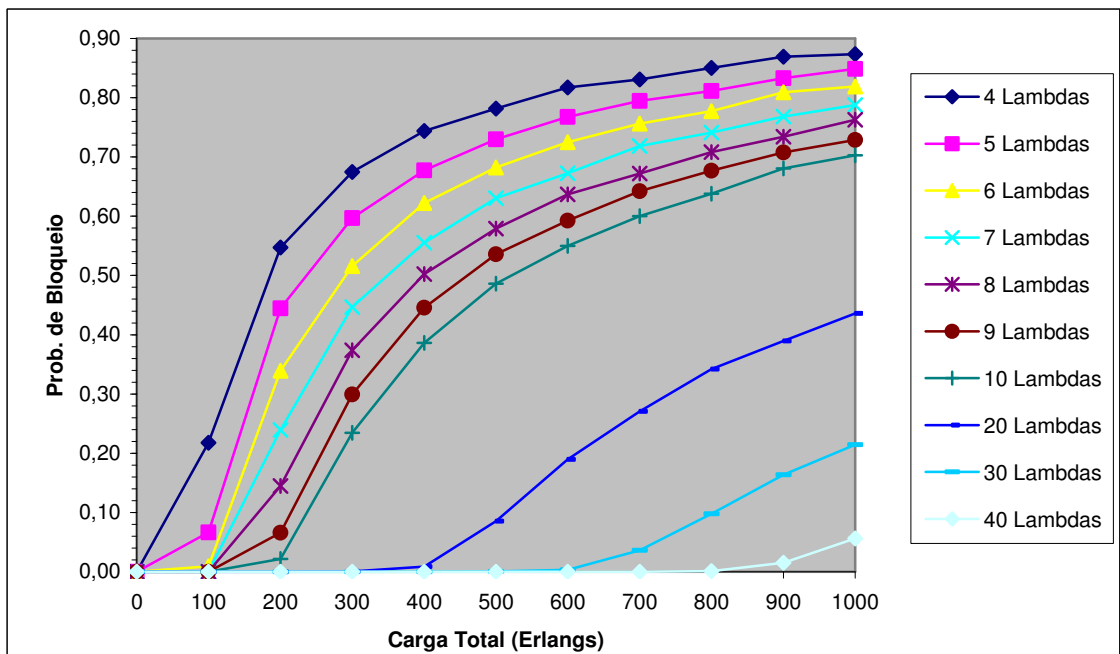


Figura 5.2 - Variação do Bloqueio de conexões com a Carga Total na Topologia II conforme o aumento do número de lambdas.

A partir dos gráficos obtidos nas simulações, foi verificado que, para um limite de 5% de bloqueio de conexões com 40 lambdas por fibra, a rede na topologia I suporta 270 Erlangs de carga máxima total, enquanto na topologia II suporta 1000 Erlangs, portanto, uma capacidade de tráfego dinâmico quase quatro vezes maior (3,7 vezes).

Na topologia I, há um bloqueio muito maior nas requisições de *lightpaths* que na topologia II, como era esperado, devido ao menor número de interconexões, o que permite uma maior variedade de pares rotas/comprimento de onda a serem selecionados.

A probabilidade de bloqueio obtida com 4 lambdas para 300Erlangs de carga é de 0,67 na topologia II e 0,84 na topologia I. Portanto, na topologia II, a probabilidade de bloqueio para 300 Erlangs de carga é 20,2% menor que na topologia I, utilizando-se 4 lambdas por fibra.

A mesma análise, considerando-se agora 10 lambdas, mostra que há uma probabilidade de bloqueio de 0,24 para a topologia II e de 0,66 para a topologia I. Neste caso, na topologia II, a probabilidade de bloqueio é 63,6% menor que na topologia I para uma carga de 300 Erlangs. Nota-se um desempenho ainda superior ao do caso anterior devido à maior diversidade de pares rota/comprimento de onda.

Isso comprova a análise de Mokhtar e Azizoglu [28], demonstrando que quando há poucos lambdas na rede, o principal fator limitante é a falta de recursos. Mesmo que haja muitas rotas disponíveis, se há poucos lambdas, o bloqueio será elevado e limitado por este motivo.

A topologia II necessita de um número bem menor de lambdas que a topologia I para uma mesma carga de tráfego na rede, conforme era esperado. Porém, as simulações permitem mensurar esta diferença com precisão.

Por exemplo, para uma carga total na rede de 200 Erlangs e um máximo de 5% de bloqueio nas requisições de conexão seriam necessários mais de 30 lambdas por fibra na topologia I e apenas 10 lambdas na topologia II.

Caso deseje-se utilizar apenas 50% da capacidade de carga total da rede, mantendo o bloqueio abaixo de 5% e reservando banda para proteção das vias, a topologia I iria necessitar de pelo menos 30 lambdas, enquanto para a topologia II bastariam 20 lambdas.

Os gráficos obtidos permitem determinar claramente o ponto de trabalho que é desejado para a rede e também estabelecer os seus limites de carga em relação ao bloqueio de conexões conforme a adição de lambdas na rede. Isso permite planejar a aquisição de recursos e a implementação de interconexões conforme o aumento de tráfego.

### 5.1.2. Análise do limite de carga total em relação ao número de lambdas

Nestas simulações, a probabilidade de bloqueio é analisada novamente em função do aumento de carga total da rede e do número de lambdas por fibra. O número de comprimentos de onda na rede foi fixado nos seguintes valores e ordem: 4, 5, 6, 7, 8, 9, e 10 lambdas.

A probabilidade de bloqueio de conexões foi novamente simulada para cada um destes valores nas topologias I e II da rede KyaTera buscando determinar, para cada um deles, a carga máxima de tráfego, de modo que o bloqueio na requisição de *lightpaths* fique no máximo em 5%.

Foi efetuada a variação da carga de tráfego até um limite máximo de 60 Erlangs para a topologia I e 240 Erlangs para a topologia II, utilizando-se um máximo de 10 lambdas, para obtenção de uma maior precisão na determinação dos valores de bloqueio na região de 5%. Estes limites foram estabelecidos com base nos gráficos das figuras 5.1 e 5.2 para 10 lambdas.

Os resultados obtidos para as topologias I e II encontram-se nas figuras 5.3 e 5.4 respectivamente.

A seguinte configuração foi adotada para estas simulações:

- Algoritmo: **wsAUR**.
- Carga Total: 60 Erlangs para a topologia I e 240 Erlangs para a topologia II.

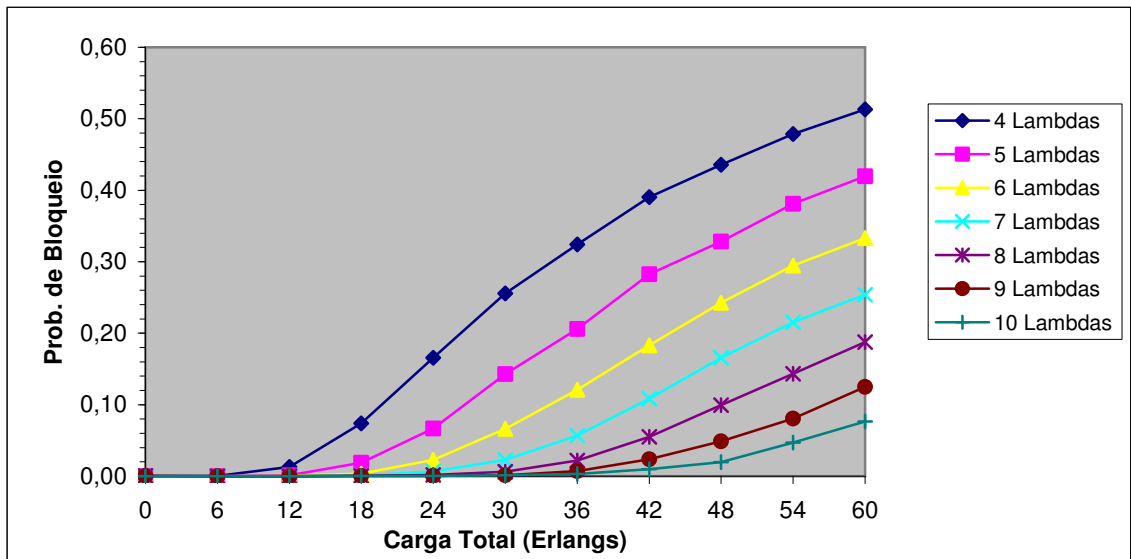


Figura 5.3 - Variação do Bloqueio com a Carga Total na Topologia I entre 4 e 10 lambdas.

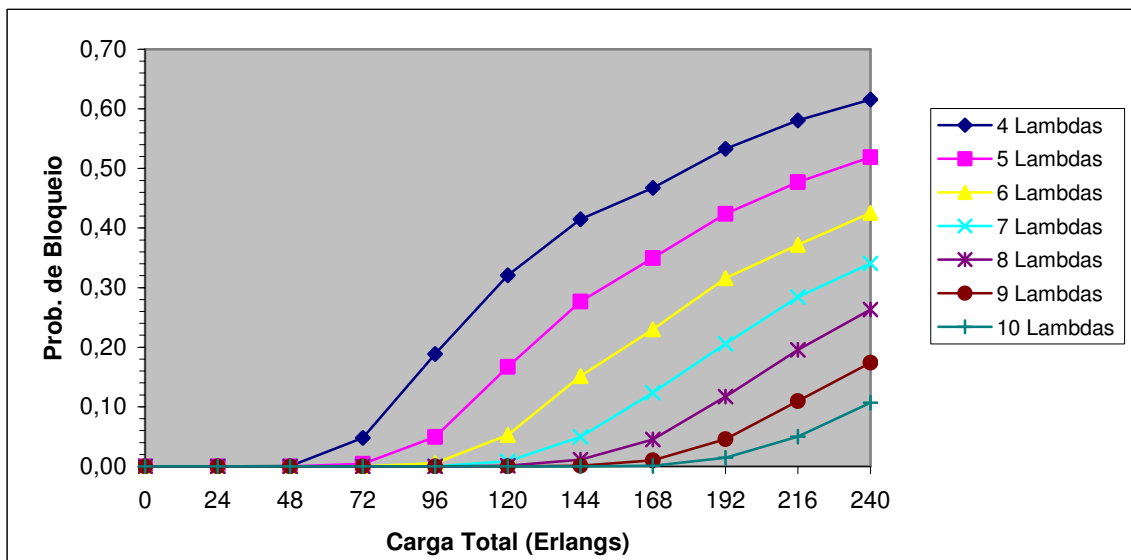


Figura 5.4 - Variação do Bloqueio com a Carga Total na Topologia II entre 4 e 10 lambdas.

A tabela 5.2 mostra os valores de carga obtidos com as simulações nos quais o bloqueio de conexões atinge o valor máximo de 5%. Os valores de carga que consideram mais de 10 lambdas na rede, foram extraídos das figuras 5.1 e 5.2 do item anterior para uma análise completa.

**Tabela 5.2 - Comparação dos Valores Máximos de Carga para um limite de 5% de Bloqueio nas Topologias I e II.**

NÚMERO DE LAMBIDAS	CARGA MÁXIMA PARA BLOQUEIO DE 5% (ERLANGS)	
	Topologia I	Topologia II
4	16	70
5	22	94
6	28	120
7	35	142
8	42	170
9	48	190
10	55	214
20	124*	450**
30	200*	720**
40	270*	1000**

\* Valores extraídos da figura 5.1

\*\* Valores extraídos da figura 5.2

Pelas simulações realizadas, nota-se que a probabilidade de bloqueio de conexões atinge o valor de 5% no caso de uma carga de tráfego muito maior na topologia II que na topologia I.

Os resultados dessas simulações mostram, claramente, quando seria necessário o acréscimo de lambdas à rede para cada topologia, de modo que o bloqueio de conexões fique abaixo de 5%.

Por exemplo, para quatro lambdas, na topologia I, com carga superior a 16 Erlangs já seria necessário adicionar um lambda em cada fibra, enquanto que na topologia II, só com carga superior a 70 Erlangs isso seria necessário. Seriam necessários mais de 10 lambdas para suportar esta mesma carga de 70 Erlangs na topologia I.

Cada lambda acrescentado na topologia I permite uma carga adicional de 6 Erlangs na rede em média, enquanto na topologia II, esta carga adicional está em torno de 24 Erlangs. Isso representa um melhor aproveitamento de cada comprimento de onda acrescentado à rede.

Nota-se, portanto, um desempenho muito superior (pelo menos quatro vezes) da topologia II em relação à topologia I em todos os aspectos, o que representa uma economia muito significativa de recursos como, por exemplo, placas de canal para os equipamentos DWDM em cada nó.

### 5.1.3. Variação do Bloqueio com a Carga Total para diferentes Algoritmos RWA

Neste item, são comparados os desempenhos de alguns algoritmos RWA em relação ao bloqueio de conexões conforme o aumento da carga de tráfego na rede.

São consideradas duas situações: a primeira com apenas uma rota alternativa (figuras 5.5 e 5.6) e, em seguida, com no máximo três rotas alternativas (figuras 5.7 e 5.8) para algoritmos que consideram este parâmetro.

Foi utilizado um intervalo de carga que permitisse, com melhor precisão, a análise da rede para um bloqueio em torno de 5%. Para estas simulações, foi adotado o cenário inicial da rede Kyatera com 4 lambdas em cada topologia.

A seguinte configuração foi adotada para estas simulações:

- Algoritmos: **wsAUR**, **wsMRPR**, **wsAlt**, **wsLLR**, **wsAltMCR** e **wsAltMRPR**.
- Carga Máxima: 50 Erlangs para a topologia I e 200 Erlangs para a topologia II.



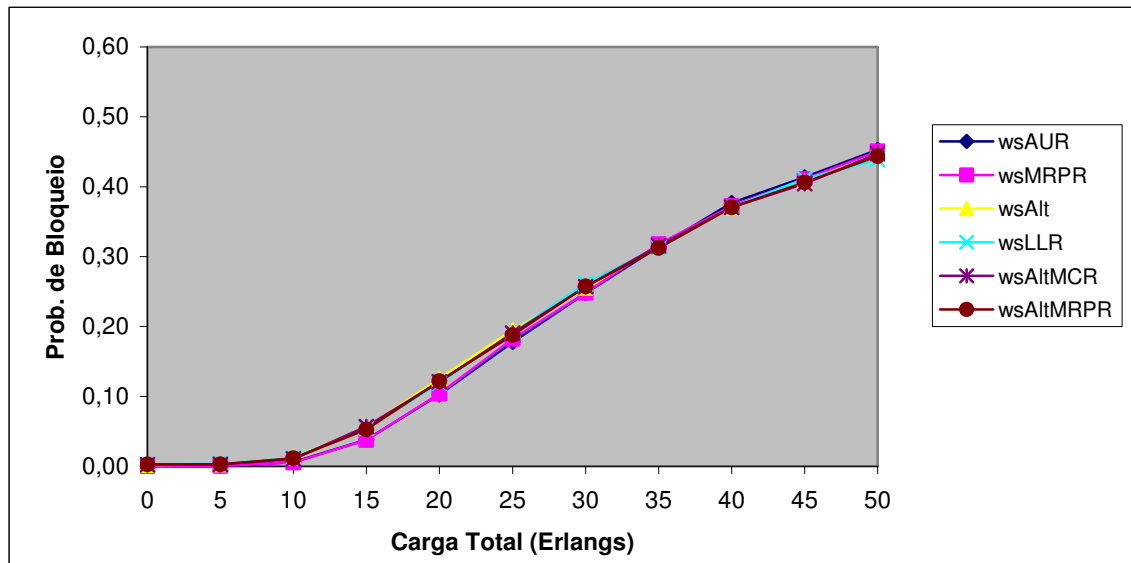


Figura 5.5 - Variação do Bloqueio com a Carga Total para diferentes Algoritmos RWA na Topologia I - 4 lambdas - 1 Rota Alternativa.

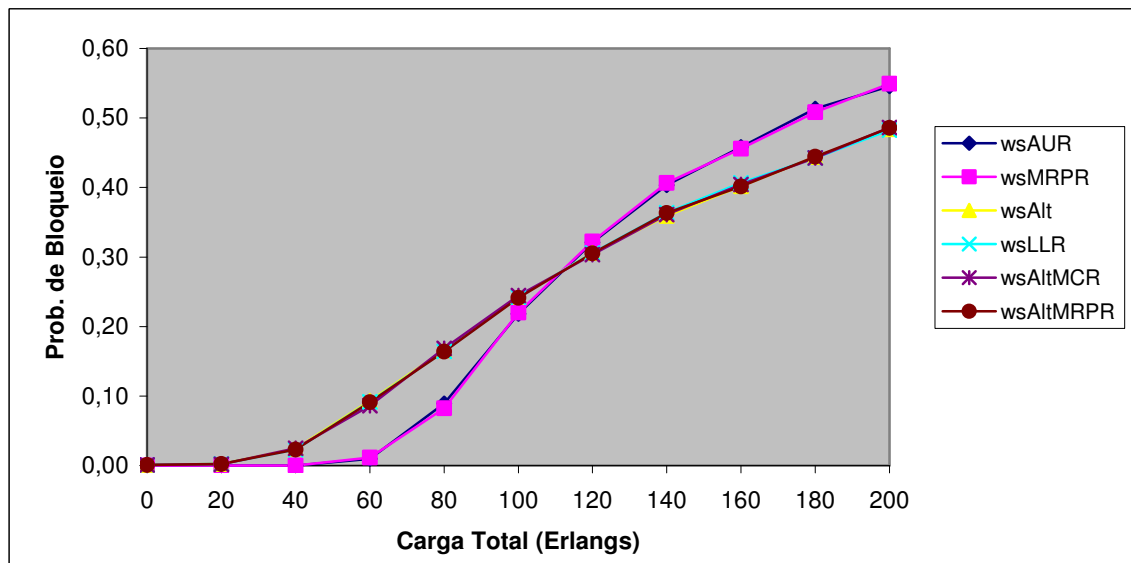


Figura 5.6 - Variação do Bloqueio com a Carga Total para diferentes Algoritmos RWA na Topologia II - 4 lambdas - 1 Rota Alternativa.

Na topologia I (figura 5.5), nota-se um comportamento da rede praticamente igual para todos os algoritmos utilizados. A variação do bloqueio com a carga é praticamente a mesma para qualquer algoritmo, mas nota-se uma probabilidade ligeiramente menor (0,02) na faixa entre 5 e 30 Erlangs para os algoritmos wsAUR e wsMRPR em relação aos demais.

Para carga superior a 35 Erlangs, nota-se uma inversão deste comportamento e os algoritmos diferentes destes dois possuem probabilidade ligeiramente menor (0,02 em 50Erlangs). Isso ocorre porque os algoritmos wsAUR e wsMRPR não consideram o congestionamento no cálculo das vias, o que ocorre com os demais algoritmos.

Considerando-se o critério de no máximo 5% de bloqueio, foi verificado que, para os algoritmos wsAUR e wsMRPR, a carga máxima permitida é de 17 Erlangs, enquanto que, para os demais algoritmos, seria de 14 Erlangs. Isso representa um ganho de 21% em termos de carga para uma mesma probabilidade de bloqueio, apenas utilizando-se algoritmos RWA diferentes.

Na topologia II, verificando-se a figura 5.6, nota-se que os comportamentos dos algoritmos RWA são mais distintos que na topologia I e que há também um ponto de inversão dos mesmos.

No caso de uma carga de 60 Erlangs, a probabilidade de bloqueio é de 0,01 para os algoritmos wsAUR e wsMRPR e de 0,09 para os demais algoritmos.

Considerando-se o critério de no máximo 5% de bloqueio, os algoritmos wsAUR e wsMRPR permitem uma carga máxima de 70 Erlangs, enquanto os demais algoritmos limitam a mesma em 45 Erlangs. Portanto, há um ganho de 55,5% em termos de carga para uma mesma probabilidade de bloqueio.

Se fosse adotado o algoritmo wsAUR, só seria necessário acrescentar novo lambda à rede a partir de uma carga de 70 Erlangs. Já com outros algoritmos, outro lambda deveria ser acrescentado a partir de uma carga de tráfego de 45 Erlangs.

Para carga acima de 110 Erlangs, o desempenho dos demais algoritmos superam o desempenho dos algoritmos wsAUR e wsMRPR, chegando a apresentar uma probabilidade de bloqueio 12,7% menor pelo mesmo motivo já explicado. Porém, nesta situação, o bloqueio de conexões já estaria em torno de 50%, o que é inviável para o funcionamento de uma rede GMPLS. Portanto, para a faixa de trabalho da rede (considerada até o limite de 5%), os algoritmos wsAUR e wsMRPR possuem melhor desempenho.

Os resultados mostram, portanto, que a escolha correta do algoritmo pode afetar o desempenho da rede em relação ao bloqueio de conexões, constituindo-se como mais um parâmetro a ser considerado no dimensionamento das redes GMPLS com tráfego dinâmico.

Para uma comparação mais completa entre os algoritmos RWA, foram adotadas, a seguir, três rotas alternativas para os algoritmos que usam roteamento fixo-alternado. Os resultados encontram-se nas figuras 5.7 e 5.8.

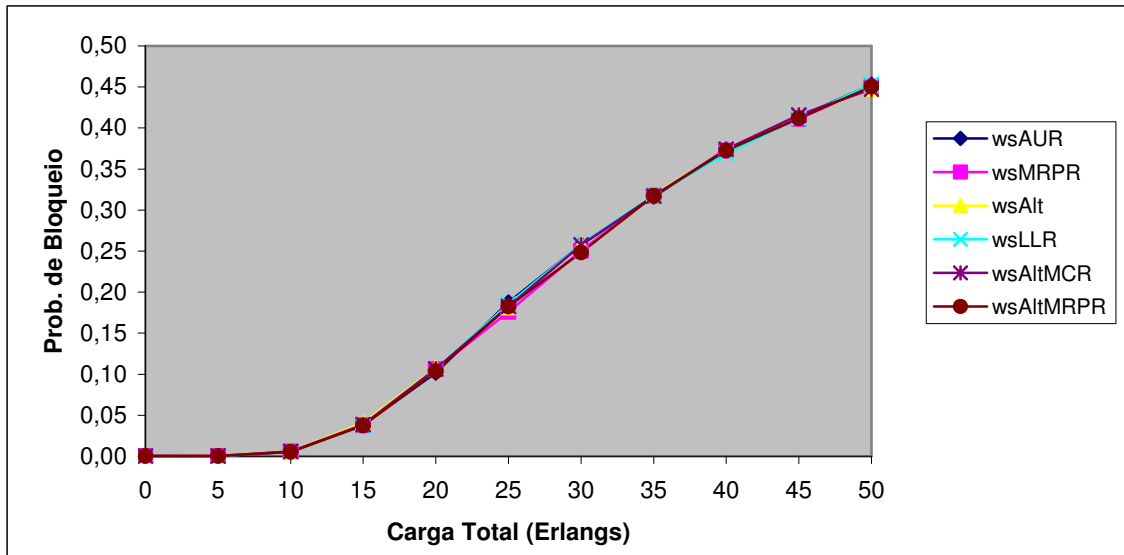


Figura 5.7 - Variação do Bloqueio com a Carga Total para diferentes Algoritmos RWA na Topologia I - 4 lambdas - 3 Rotas Alternativas.

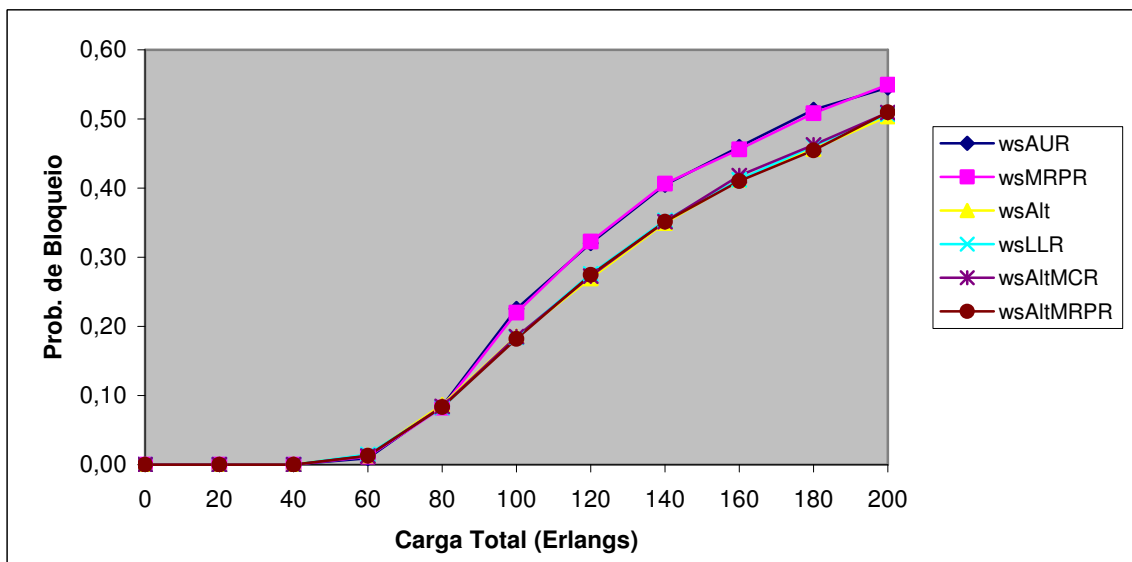


Figura 5.8 - Variação do Bloqueio com a Carga Total para diferentes Algoritmos RWA na Topologia II - 4 lambdas - 3 Rotas Alternativas.

Para um maior número de rotas alternativas, os desempenhos dos algoritmos RWA aproximam-se e todos possuem comportamento muito semelhante ao do wsAUR e wsMRPR.

Na topologia I, para qualquer algoritmo utilizado e para uma probabilidade de bloqueio de conexões de 5%, a carga máxima permitida é de 17 Erlangs.

Na topologia II, esta carga máxima é de 70 Erlangs para qualquer algoritmo e já não ocorre o ponto de inversão de comportamento. Porém, a partir de 80 Erlangs, os algoritmos diferentes de wsAUR e wsMRPR possuem melhor desempenho, com a probabilidade chegando a ser 9,1% menor em 200 Erlangs. Isso é explicado devido à utilização de um maior número de rotas alternativas aliado ao fato dos algoritmos fixo-alternado adotados considerar o congestionamento na rede.

O uso de rotas alternativas é, portanto, outro item a ser definido no dimensionamento da rede e na configuração dos algoritmos RWA, mas é importante ressaltar que isso significa maior número de parâmetros a serem divulgados e maior tempo de processamento para o cálculo de rotas.

## 5.2. Simulação com base na Taxa de Elementos Não Confiáveis

Conforme abordado no capítulo 2, um dos fatores a serem considerados no estudo de uma rede GMPLS é a ocorrência de falhas, o que leva a um reroteamento dos *lightpaths* de acordo com o critério de proteção adotado.

Neste item, considera-se a variação da taxa de falhas na rede para investigação dos limites da mesma quanto ao bloqueio de conexões e à carga de tráfego dinâmico. Para isso, é considerada a existência de elementos não confiáveis (enlaces e roteadores) e a variação da taxa dos mesmos na rede Kyatera nas topologias I e II.

A taxa de elementos não confiáveis é dada pela relação:

$$\text{Taxa de Elementos Não Confiáveis (TENC)} = \frac{\text{n}^{\circ} \text{ de elementos não confiáveis}}{\text{n}^{\circ} \text{ total de elementos}}$$

Com o intuito de investigar o efeito da taxa de elementos não confiáveis no bloqueio de conexões, foram realizadas três análises nas quais a carga total foi fixada e esta taxa foi variada para verificação da influência deste parâmetro no dimensionamento da rede.

A primeira análise consiste em verificar o efeito da probabilidade de falha dos elementos não confiáveis no bloqueio de conexões, observando-se a partir de qual valor este efeito passa a ser significativo para as duas topologias. Para isso, foram considerados quatro valores de probabilidade de falha para os elementos não confiáveis e observado como o bloqueio varia com a taxa de elementos não confiáveis para cada um. Esta análise foi realizada, considerando-se 4 lambdas por fibra.

Na segunda análise, foi variado o número de comprimentos de onda por fibra e selecionada a correspondente carga que mantém o bloqueio de conexões na faixa de 5%. Foi realizada uma simulação para cada número de lambdas entre 4 e 40, na mesma seqüência do item 5.1.1.

Na terceira análise, foram realizadas simulações, nas quais verificou-se a variação do bloqueio de conexões com a taxa de elementos não confiáveis, comparando-se o desempenho de vários algoritmos RWA. Esta análise foi realizada para uma e três rotas alternativas, considerando-se 4 lambdas por fibra.

Os resultados obtidos estão descritos nos itens seguintes.

### **5.2.1. Variação do Bloqueio com a Taxa de Falha dos Elementos Não Confiáveis**

Neste item, é analisada a variação do bloqueio para diferentes probabilidades de falha dos elementos não confiáveis para 4 lambdas nas topologias I e II, com a finalidade de verificar até que ponto a existência de elementos menos confiáveis afeta o desempenho da rede Kyatara. Isso significa analisar o comportamento da rede para diferentes índices de confiabilidade.

Para esta análise, foram considerados elementos não confiáveis que falham com as seguintes probabilidades: 1/1000, 1/100, 1/20 e 1/10. Estes valores foram selecionados de modo a enfatizar o efeito da utilização de elementos menos confiáveis no desempenho da rede e de modo a verificar a partir de qual valor de probabilidade, o bloqueio torna-se elevado e mais significativo para uma mesma carga.

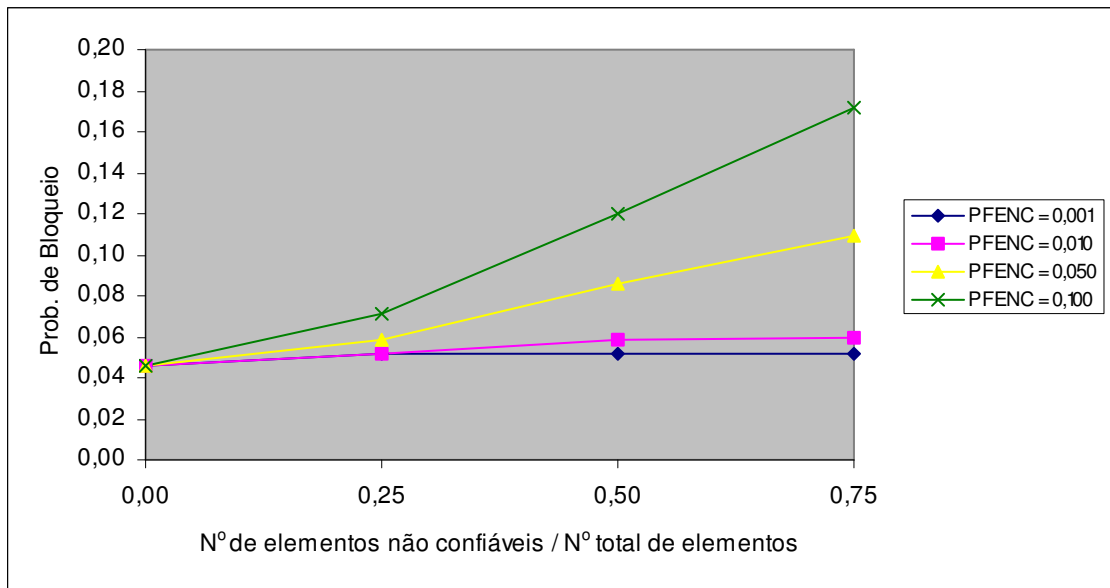
As simulações foram realizadas nas topologias I e II, obtendo-se a variação do bloqueio na faixa de 5% com o aumento contínuo da taxa de elementos não confiáveis para diferentes probabilidades de falha dos mesmos.

Nestas simulações, foi utilizado o algoritmo wsAUR para 4 lambdas com cargas de 16 e 74 Erlangs para as topologias I e II respectivamente. Foi realizada uma simulação

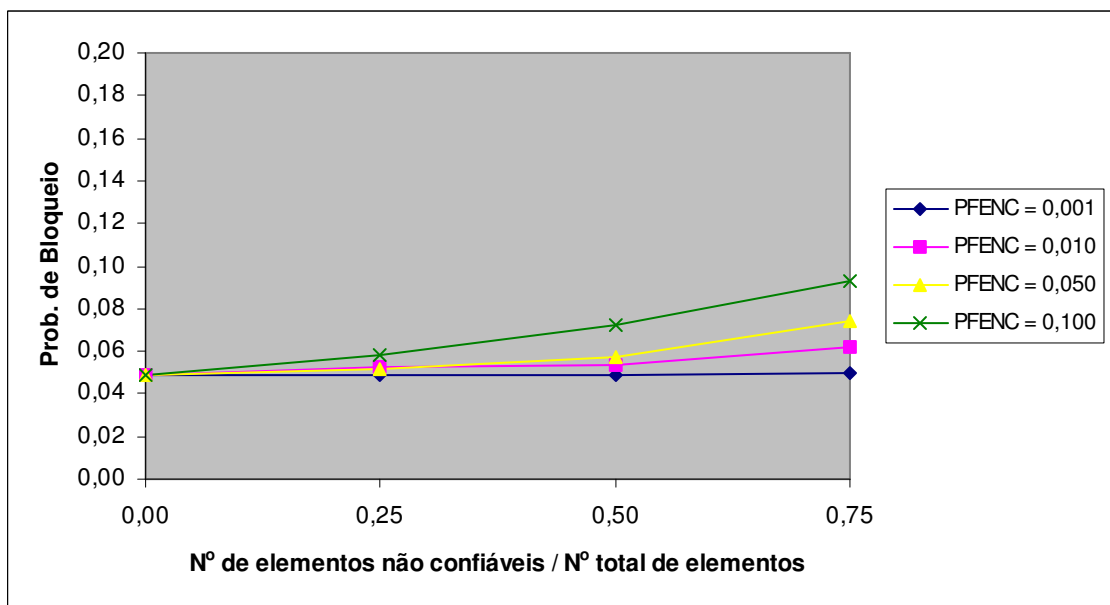
para cada valor de probabilidade de falha do elemento não confiável (PFENC). Os seguintes valores foram fixados no simulador para os parâmetros de falha:

- Porcentagem de elementos não confiáveis na rede (*Failure Dist.*) = 10%
- Taxa de falha de elementos confiáveis (*Failure Rate Low*) = 1/10000

Os resultados obtidos para as topologias I e II encontram-se nas figuras 5.9 e 5.10 respectivamente.



**Figura 5.9 - Variação da probabilidade de bloqueio para diferentes valores de prob. de falha dos elementos não confiáveis na Topologia I – 4 Lambdas.**



**Figura 5.10 - Variação da probabilidade de bloqueio para diferentes valores de prob. de falha dos elementos não confiáveis na Topologia II – 4 Lambdas.**

Pelos resultados obtidos, nota-se que a probabilidade de bloqueio aumenta, quando elementos menos confiáveis (fibras e roteadores) são utilizados na rede Kyatera tanto na topologia I como na topologia II.

A topologia I mostra-se mais sensível ao aumento da probabilidade de falha dos elementos não confiáveis que a topologia II. Por exemplo, para uma probabilidade de falha de 0,05 para os elementos não confiáveis e taxa de falhas de 0,50, a probabilidade de bloqueio atinge um valor de 0,080 na topologia I e de 0,055 na topologia II. Se a probabilidade dos elementos não confiáveis é de 0,10, estes valores, para as topologias I e II, aumentam para 0,120 e 0,070 respectivamente.

Nota-se que este aumento na variação do bloqueio fica mais significativo para elementos que falham com uma probabilidade maior ou igual a 0,010 (1/100). Exatamente este valor de 0,010 foi adotado como probabilidade de falha dos elementos não confiáveis para as próximas simulações deste item 5.2 por ser considerado o limiar.

Na topologia I, este efeito é mais crítico devido à existência de um menor número de interconexões, não permitindo muitas alternativas de rota, quando ocorrem as falhas.

### **5.2.2. Variação do bloqueio com o número de elementos não confiáveis**

Neste item, é analisada a variação do bloqueio de conexões com a taxa de elementos não confiáveis para 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 30 e 40 lambdas.

Foram utilizados diferentes valores de cargas para cada número de lambdas adotado, de modo a manter o bloqueio na faixa de 5%. Estes valores de carga tomados como referência foram estimados a partir dos gráficos das figuras 5.1 a 5.4.

Na figura 5.11 são mostrados os resultados obtidos por simulação para a topologia I sobrepondo a variação do bloqueio com a taxa de elementos não confiáveis para cada número de lambdas na faixa de 5%. Na figura 5.12 são mostrados os resultados obtidos da mesma forma para a topologia II.

A finalidade destas simulações é verificar para cada número de lambdas e para a carga que permita 5% de bloqueio máximo como o bloqueio de conexões varia com a taxa de elementos não confiáveis nestas condições de carga para cada número de lambdas adotado na rede.

A seguinte configuração foi adotada no simulador:

- Algoritmo: wsAUR
- Número de lambdas por fibra: 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 30 e 40 lambdas
- Porcentagem de elementos não confiáveis na rede (*Failure Dist.*) = 10%
- Taxa de falha de elementos não confiáveis (*Failure Rate High*) = 1/100
- Taxa de falha de elementos confiáveis (*Failure Rate Low*) = 1/10000

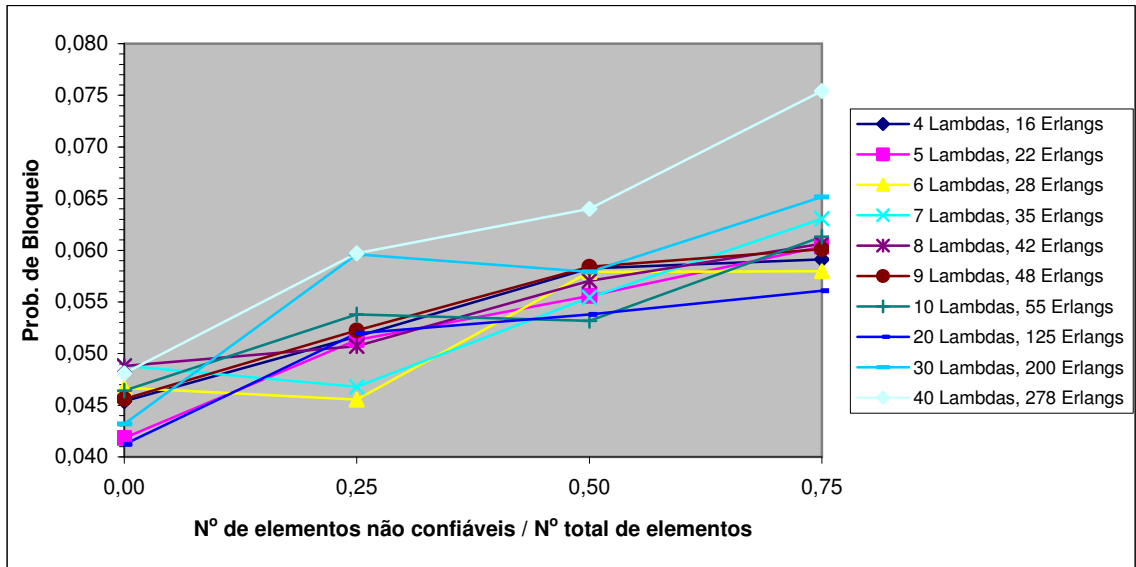


Figura 5.11 - Variação da probabilidade de bloqueio com a taxa de elementos não confiáveis na Topologia I para diferentes valores de carga e de comprimento de onda.

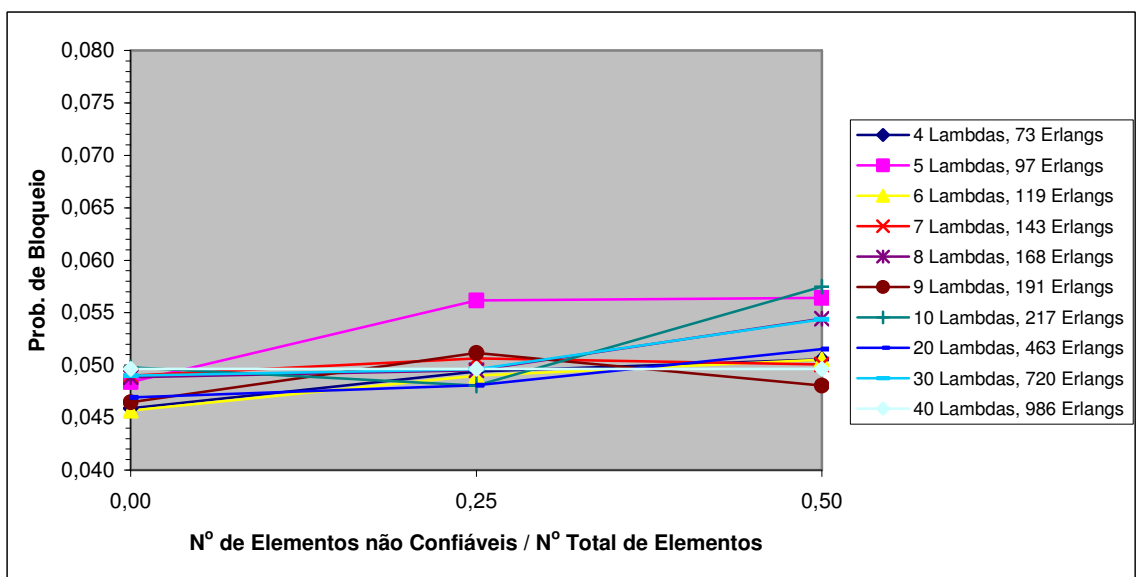


Figura 5.12 - Variação da probabilidade de bloqueio com a taxa de elementos não confiáveis na Topologia II para diferentes valores de carga e de comprimento de onda.



Pelos resultados obtidos, nota-se que, para o tipo de elemento não confiável adotado (probabilidade de 1/100), há um aumento da probabilidade de bloqueio com a taxa de elementos não confiáveis bem evidente na topologia I (variação no intervalo de probabilidade entre 0,040 e 0,075).

Já na topologia II, este aumento é menos notado e o bloqueio varia pouco com este parâmetro (0,045 a 0,057). Por exemplo, para 40 lambdas e 986 Erlangs de carga, o bloqueio permanece constante em 4,9%, não variando com o aumento da taxa de elementos não confiáveis. Isso ocorre porque, na topologia II, há um número muito maior de interconexões, o que permite encontrar uma nova rota mais facilmente, quando há falha em outras. Já na topologia I, a interconexão é muito mais restrita. Desse modo, o aumento do número de elementos não confiáveis afeta mais o bloqueio de conexões.

Nota-se que a topologia II admite um número maior de elementos não confiáveis que a topologia I de um modo geral.

Pelos valores extraídos das simulações, verifica-se que a topologia I admite até 30% de elementos não confiáveis, enquanto a topologia II admite até 42% para um limite de 5% de probabilidade de bloqueio.

Portanto, nota-se uma relação entre o número de elementos não confiáveis e o bloqueio de conexões, sendo que, para uma taxa superior a 50%, o bloqueio ultrapassa 5%, o que deve ser evitado para um bom desempenho da rede.

Para cada lambda adicionado, uma carga adicional de 6 Erlangs pode ser suportada na topologia I. Na topologia II, esta carga adicional é de 24 Erlangs na média. Portanto, é mantida a mesma relação obtida no item 5.1.

Os resultados mostram, portanto, que, utilizando elementos com probabilidade de falha de no máximo 0,01, a rede consegue encontrar rotas alternativas em caso de falhas, mantendo um bom desempenho. Caso esta probabilidade viesse a aumentar, como mostrado no item 5.2.1, a probabilidade de bloqueio certamente seria bem mais afetada.

Os gráficos também mostram que, para qualquer número de lambdas, desde que o bloqueio fique na faixa de 5%, a variação do mesmo com a taxa de elementos não confiáveis na rede possui basicamente o mesmo comportamento.

### 5.2.3. Variação do bloqueio com a taxa de falhas para diferentes Algoritmos RWA

Neste item, são comparados os desempenhos dos algoritmos RWA para a rede Kyatera, considerando-se o aumento da taxa de elementos não confiáveis.

Para estas simulações, são utilizados 4 lambdas por fibra como previsto na primeira fase do projeto Kyatera.

A carga total foi adotada de modo a observar o comportamento dos algoritmos em torno de uma taxa de bloqueio de 5%. Os valores de referência adotados com base nos itens anteriores, foram de 15 Erlangs para a topologia I e 72 Erlangs para a topologia II.

O objetivo é verificar se a utilização de diferentes algoritmos RWA diminui a probabilidade de bloqueio com o aumento da taxa de elementos não confiáveis na rede.

Os seguintes valores foram fixados no simulador para os parâmetros de falha:

- Porcentagem de elementos não confiáveis na rede (*Failure Dist.*) = 10%
- Taxa de falha de elementos não confiáveis (*Failure Rate High*) = 1/100
- Taxa de falha de elementos confiáveis (*Failure Rate Low*) = 1/10000

As figuras 5.13 e 5.14 mostram os resultados obtidos nas simulações para as topologias I e II, considerando-se 1 rota alternativa para algoritmos do tipo fixo-alternado.

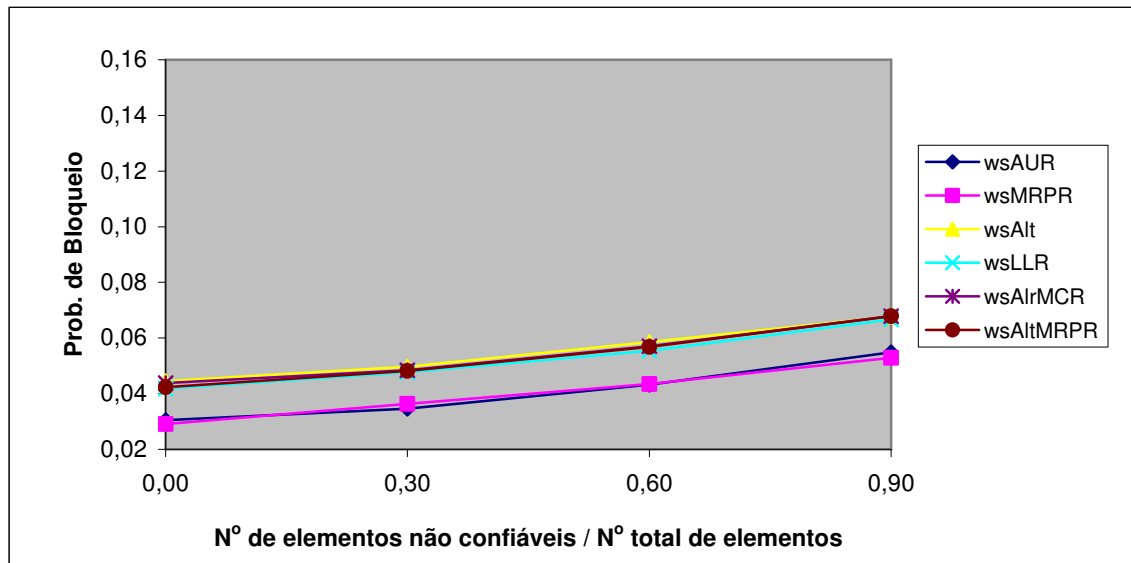


Figura 5.13 - Variação da probabilidade de bloqueio com a taxa de elementos não confiáveis para 4 lambdas na topologia I, utilizando diferentes algoritmos RWA - (Carga = 15 Erlangs).

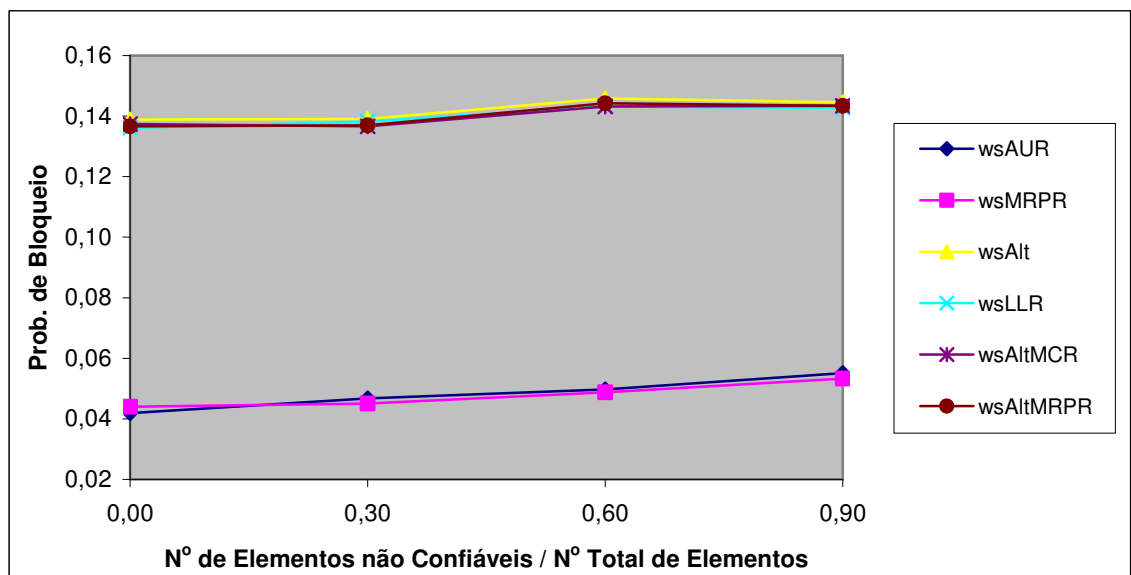


Figura 5.14 - Variação da probabilidade de bloqueio com a taxa de elementos não confiáveis para 4 lambdas na topologia II, utilizando diferentes algoritmos RWA - (Carga =72 Erlangs).

A análise dos resultados obtidos nas duas topologias permite verificar que as probabilidades de bloqueio variam de forma significativa com os tipos de algoritmos RWA utilizados, considerando-se a existência de elementos não confiáveis na rede.

Na topologia I, para os algoritmos wsAUR e wsMRPR, a probabilidade de bloqueio fica em 5% somente quando a taxa de elementos não confiáveis chega a 81%. Para os

demais algoritmos, isso já ocorre com uma taxa de 35% de elementos não confiáveis na rede.

Na topologia II, a diferença do bloqueio de conexões é ainda maior que na topologia I devido a maior disponibilidade de recursos, que permite um desempenho máximo dos algoritmos, favorecendo os adaptativos que encontram mais pares de rota/comprimento de onda na rede.

Para os algoritmos wsAUR e wsMRPR, o bloqueio não chega a 5% para a carga de 72 Erlangs, ficando no máximo em 4,7%. Já para os demais algoritmos, a probabilidade de bloqueio fica em torno de 13,5% para as mesmas condições da rede. Estes algoritmos não poderiam, portanto ser usados nesta condição de carga, pois não permitem um bloqueio inferior a 5%.

Fica também claro que há um aumento da probabilidade de bloqueio de conexões com o aumento de elementos não confiáveis na topologia I, enquanto, na topologia II, o bloqueio se mantém num valor praticamente constante. Este comportamento na topologia II é verificado em todos os algoritmos, o que mostra que o mesmo depende mais dos recursos e da topologia da rede que dos algoritmos RWA.

A seguir, as mesmas simulações foram efetuadas, mas considerando-se agora a utilização de 3 rotas alternativas para algoritmos do tipo fixo-alternado. Os resultados encontram-se nas figuras 5.15 e 5.16.

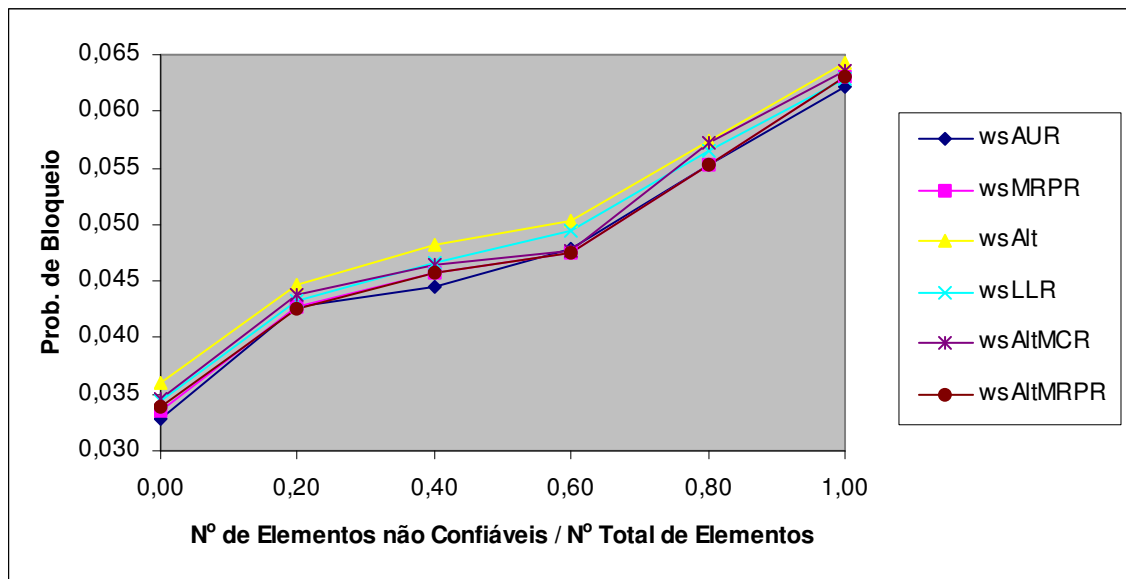


Figura 5.15 - Variação do Bloqueio com o número de elementos não confiáveis para diferentes Algoritmos RWA na Topologia I - 4 lambdas - 3 Rotas Alternativas.

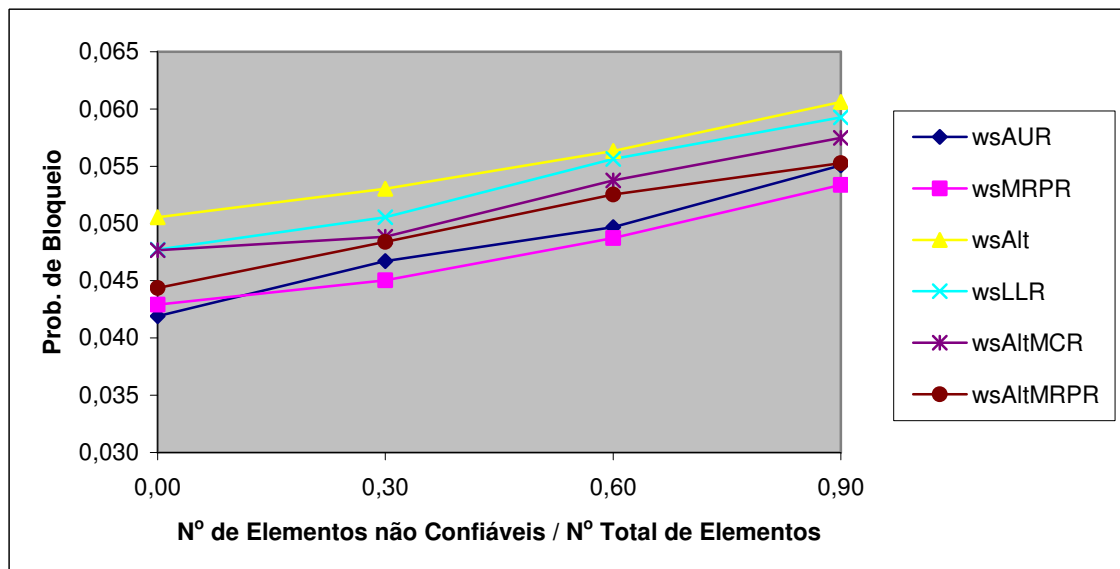


Figura 5.16 - Variação do Bloqueio com o número de elementos não confiáveis para diferentes Algoritmos RWA na Topologia II - 4 lambdas - 3 Rotas Alternativas.

Pelos resultados obtidos, nota-se que, tanto na Topologia I como na Topologia II, o desempenho dos algoritmos do tipo fixo-alternado aproximou-se do desempenho dos algoritmos wsAUR e wsMRPR devido ao número maior de rotas alternativas.

Por exemplo, para o algoritmo wsAlt, a probabilidade caiu de 0,067 da figura 5.13 para 0,044 na figura 5.15, para uma taxa de 30% de elementos não confiáveis e 3 rotas alternativas na topologia I. Na topologia II, esta diferença é ainda mais significativa e a

probabilidade caiu de 0,14 (figura 5.14) para 0,052 (figura 5.16) para a mesma condição.

Deste modo, todos os algoritmos poderiam ser utilizados para as cargas de 15 e 72 Erlangs nas topologias I e II respectivamente.

Portanto, a utilização de um número maior de rotas alternativas diminuiu drasticamente o bloqueio de conexões para algoritmos do tipo fixo-alternado na presença de elementos não confiáveis na rede, o que fica mais evidente em redes com maior número de interconexões.

### **5.3. Conclusão**

Os resultados apresentados neste capítulo demonstram como as simulações com algoritmos RWA podem ser utilizadas como ferramenta de dimensionamento de uma rede totalmente óptica controlada pelo GMPLS.

A diferença entre as topologias pôde ser mensurada com precisão permitindo prever a expansão da rede e verificar seus limites quanto à carga e bloqueio, além de sua tolerância à ocorrência de falhas.

Ficou claro também o melhor desempenho dos algoritmos RWA do tipo adaptativo para condições de baixa carga, principalmente na ocorrência de falhas.

Demais conclusões são apresentadas no capítulo seguinte.

## 6. CONCLUSÃO

O estudo realizado neste trabalho mostra que uma rede GMPLS traz novos desafios para seu correto dimensionamento.

Diferente do dimensionamento de redes telefônicas, a rede GMPLS deve atuar sobre uma rede totalmente óptica que adiciona a restrição de uso de um mesmo lambda em todos os trechos da rota fim-a-fim, quando não são utilizados conversores ópticos.

Além da topologia, a utilização de algoritmos RWA apropriados afetam o desempenho da rede, permitindo um melhor aproveitamento dos recursos conforme o aumento do tráfego.

No estudo aqui realizado a respeito das topologias evolutivas da rede KyaTera, foi possível comprovar que a topologia II apresenta um desempenho muito melhor que o da topologia I por utilizar uma maior interconexão de nós. Este trabalho demonstra como esta diferença pode ser mensurada e como a rede pode ser dimensionada e planejada a partir dos resultados obtidos nas simulações com algoritmos RWA.

As simulações mostram claramente como dimensionar a rede conforme o tráfego exigido e a taxa de bloqueio de conexões admitida. Mostram também como mensurar esta diferença entre as topologias quanto ao desempenho das redes, permitindo a previsão de recursos conforme o aumento do tráfego e certa probabilidade de falhas.

### 6.1. Análise dos resultados

Pelos resultados obtidos nota-se que são necessários cerca de quatro vezes menos comprimentos de onda à topologia II que à topologia I, para um mesmo tráfego ou, para um mesmo número de lambdas por fibra, a topologia II admite cerca de quatro vezes mais carga que a topologia I. Poder mensurar esta diferença de desempenho entre as topologias é uma das finalidades destas simulações, o que permite dimensionar corretamente os recursos e adquiri-los sem desperdício.

Para que seja possível esta análise, faz-se necessário adotar uma determinada probabilidade máxima de bloqueio acima da qual, o serviço prestado pela rede pode ser degradado. No estudo apresentado, o valor máximo de bloqueio adotado foi de 5%.

Admitindo este limite, a carga máxima para cada lambda pôde ser determinada, permitindo prever a partir de qual valor seria necessário adicionar um lambda em cada

topologia. Pôde-se ainda verificar qual carga de tráfego adicional é admitida para cada lambda acrescentado.

Pelos resultados obtidos, a carga máxima na rede para 40 lambdas e 5% de bloqueio ficou em 270 Erlangs para a topologia I e 1000 Erlangs para a topologia II.

Foi verificado que para cada 6 Erlangs de carga adicional na topologia I é necessário acrescentar um novo lambda, enquanto na topologia II isso só é necessário para uma carga incremental de 24 Erlangs, mantendo o bloqueio no máximo em 5%.

Para utilização de 50% da capacidade da rede, mantendo banda para proteção das vias, seriam necessários pelo menos 30 lambdas na topologia I e 20 lambdas na topologia II.

Porém, o número de lambdas não pode ser dimensionado apenas em termos da carga na rede. A segunda parte das simulações mostra claramente que a existência de falhas nos enlaces e nos elementos de rede afeta a probabilidade de bloqueio de conexões, sendo necessário considerar também este parâmetro no dimensionamento de uma rede GMPLS.

Os resultados mostram que o bloqueio de conexões aumenta quando são utilizados elementos menos confiáveis nas duas topologias, mas que a rede é capaz de absorver determinada taxa de falhas graças ao roteamento de conexões.

Foi verificado que, somente quando a probabilidade de falha dos elementos não confiáveis chega a 0,01 a rede fica sensível à ocorrência de falhas e o bloqueio começa a aumentar de forma considerável. Para valores de probabilidade abaixo de 0,01 a variação com a taxa de elementos não confiáveis praticamente não ocorre e os mesmos valores de carga para 5% de bloqueio, utilizados na primeira parte, são suportados nas topologias I e II.

Mesmo quando a taxa de elementos não confiáveis foi variada, a topologia II também se mostrou superior à topologia I, admitindo uma taxa maior de elementos não confiáveis (42% na topologia II contra 30% na topologia I aproximadamente).

As simulações permitem, portanto, determinar claramente o melhor ponto de trabalho das duas topologias, considerando a variação do bloqueio com a carga, com a taxa de elementos não confiáveis e para diferentes números de lambdas na rede.

Os resultados mostram que, numa rede GMPLS dinâmica, não pode ser considerado um único parâmetro para dimensionamento da mesma, sendo necessária uma análise completa de todos os fatores que possam afetar o bloqueio de conexões.



Nesta análise, a importância da estabilidade da rede e também a necessidade de mecanismos de proteção e de restauração para manter o desempenho da rede mesmo na presença de falhas ficam claros.

## 6.2. Análise do desempenho dos algoritmos RWA

Quanto aos algoritmos RWA, ficou evidente, pelas simulações realizadas, que o desempenho dos mesmos também afeta as probabilidades de bloqueio de conexões de modo significativo, sendo necessários uma pré-análise e um conhecimento dos tipos disponíveis para se chegar a melhor implementação.

Como foi explicado, há algoritmos com roteamento fixo e adaptativo que analisam todas as alternativas possíveis de rotas, os que só buscam os caminhos mais curtos na rede, os que consideram o congestionamento, os que levam em conta as estatísticas de falha, etc.

Cada um poderá ter melhor desempenho conforme a topologia da rede e o tipo de tráfego, de carga e de falhas na rede. Pelos resultados apresentados, os algoritmos wsAUR e wsMRPR apresentaram melhor desempenho na rede KyaTera, oferecendo menor probabilidade de bloqueio que os demais algoritmos testados.

Para a primeira condição em que a taxa de elementos não confiáveis é fixada em 0,01 e a carga total da rede é variada, os algoritmos wsAUR e wsMRPR possuem melhor desempenho, o que fica mais evidente na topologia II, quando a diferença de probabilidade de bloqueio chega a praticamente 50%.

Nota-se ainda, nesta situação, que há um ponto de inversão de comportamento, onde, a partir de um determinado valor de carga, estes dois algoritmos passam a ter desempenho pior que o dos demais, por não considerarem o congestionamento na rede. Este ponto ocorre, quando a probabilidade de bloqueio chega a 28% nas duas topologias.

Quando foi adotado um máximo de 3 rotas alternativas para os algoritmos do tipo fixo-alternado, o desempenho de todos os algoritmos tornou-se praticamente igual na topologia I. Já na topologia II, os algoritmos do tipo fixo-alternado apresentaram desempenho idêntico ao dos algoritmos wsAUR e wsMRPR e desempenho de até 25% melhor a partir de 10% de bloqueio.

Na segunda condição de simulação, quando a carga é fixada e a taxa de elementos não confiáveis é variada, nota-se uma diferença mais expressiva dos algoritmos wsAUR e wsMRPR em relação aos demais.

Na topologia I, para uma rota alternativa, a diferença na probabilidade de bloqueio chega a 28,5%, diminuindo para 4% com três rotas alternativas no caso destes algoritmos. Na topologia II, esta diferença fica em 71% e 14% para 1 e 3 rotas alternativas respectivamente.

Portanto, a diferença de desempenho da rede varia de forma bastante significativa pela simples escolha dos algoritmos RWA e do número de rotas alternativas adotadas. Nota-se que a probabilidade de bloqueio variou quase quatro vezes quando o número de rotas alternativas aumentou de uma para três na topologia II.

### **6.3. Análise da metodologia empregada**

O estudo apresentado mostra, que é possível um estudo prático de uma rede GMPLS com tráfego dinâmico através de algoritmos RWA, podendo-se prever seu comportamento e dimensioná-la para trabalhar com determinados recursos dentro de limites pré-definidos de carga e de falhas na rede. Ele permite ainda uma previsão exata da expansão e da aquisição de novos recursos, desde que haja o acompanhamento do crescimento de tráfego na rede e das estatísticas de falha.

Os resultados obtidos tomando-se como referência as duas possíveis topologias da rede KyaTera, contribuem de forma significativa para o planejamento e dimensionamento de recursos para a mesma, dando uma idéia clara das vantagens do aumento das interconexões, para um mesmo número de equipamentos e comprimentos de onda.

Isso permite um melhor aproveitamento dos recursos empregados, quer seja pela mudança da topologia, como do algoritmo RWA utilizado na rede.

O estudo aqui elaborado serve como exemplo de uma análise prática da rede GMPLS KyaTera, utilizando tráfego dinâmico, mensurando os ganhos obtidos na alteração de sua estrutura e também nos seus limites de carga, bloqueio e tolerância quanto ao número de elementos não confiáveis.

#### 6.4. Trabalhos Futuros

Há outros fatores importantes no dimensionamento de redes GMPLS não considerados neste trabalho, que também podem ser incluídos em estudos futuros, como, por exemplo, a utilização de conversores de comprimento de onda, algoritmos para distribuição destes conversores de forma esparsa na rede, as limitações físicas da camada óptica, o atraso no estabelecimento dos *lightpaths*, utilização de tráfego auto-similar e também a complexidade de implementação dos algoritmos RWA.

Pode-se concluir, finalmente, que as redes GMPLS exigem novos métodos e novos conhecimentos para seu dimensionamento e para o devido planejamento dos recursos necessários para a camada óptica, visando a um desempenho satisfatório para os novos serviços, sendo que as simulações com algoritmos RWA oferecem resultados úteis que podem auxiliar neste trabalho.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] Banerjee, Ayan; Kompella, Kireeti; Rekhter, Yakov; “Generalized Multiprotocol Label Switching: An Overview of Routing and Management Enhancements”. IEEE Communications Magazine, Janeiro/2001.
- [2] Berlin, Fridtjof; Miotk, Kazimierz; Schuettemeyer, Joerg; Skogan, Rune; Thoet, Thomas; Grobe, Klaus; “MPLS/GMPLS in Optical Networking”. ADVA Optical Networking, Março/2002. <http://www.advaoptical.com> - ultimo acesso em Março/2006.
- [3] Cieutat, L.C.; Binh, L.N.; “Routing and Wavelength Assignment in GMPLS - based Optical Networks: An OMNeT++ modelling platform”. TECHNICAL REPORT OF MONASH UNIVERSITY, Outubro/2003. <http://www.batman.eng.monash.edu.au/techrep/reports/2003/MECSE-20-2003.pdf> - Março/2006.
- [4] Zhensheng, Zhang; James, Fu; Guo, Dan; Zhang, Leah; “Lightpath Routing for Intelligent Optical Networks”. IEEE Network, Agosto/2001.
- [5] Shen, Lu; Ramamurthy, Byrav; “Provisioning and restoration in the next generation optical core”. Optical Networks Magazine. Abril/2003.
- [6] Comellas, Jaume; Martínez, Ricardo; Prat, Josep; Sales, Vicente; Junyent, Gabriel; “Integrated IP/WDM Routing in GMPLS - Based Optical Networks”. IEEE Network, Abril/ 2003.
- [7] Zhou, Jun; Yuan, Xin; “A Study of Dynamic Routing and Wavelength Assignment with Imprecise Network State Information”. ICPP\_Workshops Journal, 2002.
- [8] Zang, Hui; Jue, Jason, P.; Sahasrabudde, Laxman; Ramamurthy, Ramu; Mukherjee, Biswanath; “Dynamic *Lightpath* Establishment in Wavelength-Routed WDM Networks”. IEEE Communications Magazine, Setembro/2001.
- [9] Noelle, Ng; Hoang Doan B; “GMPLS in Optical Networks”. Computing Conference, 2003. Faculty of IT, University of Technology, Sydney, 2003.
- [10] Dimitri, Papadimitriou; Bart, Rousseau; “Demystifying GMPLS – A technical perspective”. Internal Report, Dez/2003. [www.alcatel.com](http://www.alcatel.com). Último acesso em Março/2006.
- [11] Mannie, E.; “Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) – Architecture”. IETF RFC 3945, Outubro/2004.
- [12] Berger, L.; “Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) - Signaling Functional Description”. IETF RFC 3471, Janeiro/2003.
- [13] Berger, L.; “Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) - Signaling RSVP-TE Extensions”. IETF RFC 3473, Janeiro/2003.
- [14] Ashwood, P.; Smith, Ed.; Berger, L.; “Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) - Signaling Constraint-based Routed Label Distribution Protocol (CR-LDP)”. IETF RFC 3472, Janeiro/2003.
- [15] Katz, D.; Kompella, K.; Rekhter, Y.; “Routing Extensions in Support of Generalized Multi-Protocol Label Switching”. IETF RFC 4202, Janeiro/2005.
- [16] Katz, D.; Kompella, K.; Yeung, D.; “Traffic Engineering (TE) Extensions to OSPF Version 2”. IETF RFC 3630, Setembro/2003.
- [17] Smit, H.; Li, T.; “Intermediate System to Intermediate System (IS-IS) Extensions for Traffic Engineering (TE)”. IETF RFC 3784, Junho/2004.
- [18] Mannie, E.; Papadimitriou, D.; “Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) – Extensions for Synchronous Optical Network (SONET) and Synchronous Digital Hierarchy (SDH) Control”. IETF RFC 3946, Outubro/2004.
- [19] Papadimitriou, D.; “Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) – Extensions for G.709 Optical Transport Networks Control”. IETF RFC 4328, Janeiro/2006.

- [20] Lin, Z.; Pendarakis, D.; “GMPLS RSVP-TE Usage and Extensions for ASON”. IETF RFC 3474, Março/2003.
- [21] Banerjee, Ayan; Lang, Jonathan; Berger, Lou; Kompella, Kireeti; Rekhter, Yakov; “Generalized Multiprotocol Label Switching: An Overview of Signaling Enhancements and Recovery Techniques”. IEEE Communications Magazine, Janeiro/ 2001.
- [22] Koçyiğit, Altan; Bilgen, Semih; “Statistically Predictive Optimal Wavelength Routing”. Optical Networks Magazine, Dezembro/2003.
- [23] Koçyiğit, Altan; Gökisik, Demeter; Bilgen, Semih; “All-Optical Networking”. Turk J Elec Engin, Dezembro/2001.
- [24] IEC; “Generalized Multiprotocol Label Switching”. Tutorial do IEC - THE INTERNATIONAL ENGINEERING CONSORTION, Dezembro/2005, pgs 1 a 20.  
<http://www.iec.org/online/tutorials/gmpls> , último acesso em Março/2006.
- [25] Zang, Hui; Jue, Jason P.; Mukherjee, Biswanath; “A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks”. Optical Networks Magazine, Janeiro/2000, pgs 47-60.
- [26] Ye, Yabin; Cheng, Tee Hiang; Lu, Chão; “Routing and Wavelength Assignment algorithms for translucent optical networks”. Optics Communications, Vol. 229, pgs 233-239, Janeiro/2004.
- [27] Li, Bo; Chu, Xiaowen; Sohraby, Kazem; “Routing and Wavelength Assignment vs. Wavelength Converter Placement in All-Optical Networks”. IEEE Optical Communications, Agosto/2003.
- [28] Mokhtar, A.; Azizoglu, M.; “Adaptive Wavelength Routing in All-Optical Networks”. IEEE Trans. on Networking, vol. 6, no. 2, pgs. 197-206, Abril/1998.
- [29] Karasan, E.; Ayanoglu, E.; “Effects of Wavelength Routing and Selection Algorithms on Wavelength Conversion Gain in WDM Optical Networks”. IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 6, no. 2, pgs 186-195, Abril/1998.
- [30] Basbugoglu, O.; Bilgen, S.; “A Distributed Minimal Congestion Routing Algorithm for WDM Networks”. ISCIS XIV, pgs 18-20, Outubro/1999.
- [31] Yoo, J.Y.; Banerjee, S.; “Design, Analysis, and Implementation of Wavelength-Routed All-Optical Networks: Routing and Wavelength Assignment Approach”. IEEE Comm. Surveys, Dezembro/1998. <http://www.comsoc.org/pubs/surveys> - último acesso em Março/2006.
- [32] Tanenbaum, Andrew S.; “Redes de Computadores“. Editora CAMPUS, 4ª Edição, 2003. **ISBN:** 8535211853
- [33] Ramaswami, Rajiv; Sivarajan, Kumar; “Optical Networks: A Practical Perspective”. Editora: Morgan Kaufmann, 2ª Edição, 2002. **ISBN:** 1558606556