

FELIPE PEDRONI FAVORETO

Plano de Controle GMPLS para Redes Ópticas de Transporte

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de Telecomunicações e TI.

Orientador:

Prof. Dr. Anilton Salles Garcia

Co-Orientador:

Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto

Vitória, ES

2009

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Favoreto, Felipe Pedroni, 1983-
F275p Plano de controle GMPLS para redes ópticas de transporte /
Felipe Pedroni Favoreto. – 2009.
139 f. : il.

Orientador: Anilton Salles Garcia.

Co-Orientador: Marcelo Eduardo Vieira Segatto.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Comunicações óticas. 2. Telecomunicações. 3. Sistemas de transmissão de dados. 4. Redes de computadores. 5. Redes óticas de transporte. I. Garcia, Anilton Salles. II. Segatto, Marcelo Eduardo Vieira. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

FELIPE PEDRONI FAVORETO

Plano de Controle GMPLS para Redes Ópticas de Transporte

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, ênfase cursada em Telecomunicações.

Aprovada em 25 de Setembro de 2009

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Anilton Salles Garcia - Orientador

PPGEE - Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto – Co-orientador

PPGEE - Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Moisés Renato Nunes Ribeiro

PPGEE - Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Antônio Jorge G. Abelém
Universidade Federal do Pará

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família pelo apoio dado durante todos esses anos de estudo e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Maria Angélica, a minha irmã, Fabiana, e a minha namorada, Priscila, pelo amor e dedicação, pelo apoio em todas as decisões de minha vida e principalmente pela paciência durante tantos anos de estudos e batalhas.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Anilton Salles Garcia, pela nossa parceria de mais de cinco anos que resultou em um grande aprendizado, tanto profissional quanto pessoal, e que certamente definiu o profissional que sou hoje.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Marcelo Segatto pela orientação e apoio durante todo o meu mestrado. Também ao Prof. Dr. Antônio Frasson pelo apoio e empolgação.

Aos meus amigos Marcos Tadeu, Rodrigo Stange, Pedro Paulo, Fabbiano e a todos que trabalharam comigo em projetos relacionados com esta dissertação.

À Padtec pelos projetos desenvolvidos com a UFES e pela oportunidade de conhecer na prática tecnologias de ponta utilizadas no mundo das telecomunicações.

A todos os meus familiares e amigos próximos que mesmo não tendo contribuído de forma direta, contribuíram indiretamente, com seu carinho, fé e pensamento positivo.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	OBJETIVO E METODOLOGIA	20
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	21
2	REDES ÓPTICAS DE TRANSPORTE	22
2.1	PLANOS DE TRANSPORTE, DE CONTROLE E DE GERÊNCIA	22
2.2	EVOLUÇÃO DAS REDES ÓPTICAS.....	25
2.3	REDES ÓPTICAS DE TRANSPORTE (OTN)	26
2.3.1	Recomendações do ITU	27
2.3.2	Serviços Oferecidos.....	28
2.3.3	Componentes Arquiteturais de uma rede de transporte genérica.....	29
2.3.4	Estrutura de Camadas	32
2.3.5	Equipamentos OTN	36
2.4	SIMULAÇÃO DE REDES ÓPTICAS.....	45
2.4.1	Trabalhos Relacionados	46
3	PLANO DE CONTROLE GMPLS.....	48
3.1	PADRONIZAÇÕES PARA PLANO DE CONTROLE	48
3.2	MPLS.....	50
3.3	DO MPLS PARA O GMPLS	52
3.4	ARQUITETURA GMPLS	53
3.4.1	Novas tecnologias de comutação	53
3.4.2	Divisão do plano de controle.....	54
3.4.3	Separação dos planos de controle e transporte	55
3.4.4	Endereçamento no GMPLS	56
3.4.5	Os rótulos no GMPLS	57
3.4.6	Conexões bidirecionais.....	58
3.4.7	Hierarquia no GMPLS.....	58
3.4.8	Modelo de serviço.....	59
3.5	SINALIZAÇÃO	61
3.5.1	Mensagens no RSVP-TE.....	62

3.5.2	Estabelecimento, manutenção e término de um LSP	64
3.5.3	Rotas de um LSP	66
3.5.4	Sinalização Generalizada	67
3.5.5	LSP's Hierárquicos	73
3.6	ROTEAMENTO	75
3.7	GERÊNCIA DE ENLACES	81
3.8	TRABALHOS RELACIONADOS AO PLANO DE CONTROLE	82
4	PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DO PLANO DE CONTROLE GMPLS PARA OTN.....	85
4.1	QUESTÕES GERAIS	85
4.2	TIPOS DE LSP'S NA OTN.....	86
4.3	REPRESENTAÇÃO DA OTN NO PLANO DE CONTROLE	88
4.3.1	Informações para o plano de roteamento	88
4.3.2	Informações para o plano de sinalização.....	92
4.4	CONTROLADORES E O CANAL DE CONTROLE	93
4.4.1	Endereçamento.....	95
4.5	GERÊNCIA DE ENLACES	97
4.5.1	Gerência do canal de controle	97
4.5.2	Descoberta e gerência dos canais de dados	97
4.5.3	Correlação de propriedades dos enlaces	98
4.6	SINALIZAÇÃO DOS LSP'S E EXTENSÕES UTILIZADAS DO RSVP-TE	100
4.6.1	Extensões do RSVP-TE específicas para OTN	101
4.7	CONCLUSÃO	103
5	VALIDAÇÃO DA PROPOSTA	104
5.1	O SIMULADOR OMNET++	104
5.1.1	Porque o OMNET++?	105
5.1.2	Conceitos básicos do simulador	105
5.2	MODELAGEM DO CANAL DWDM	106
5.3	MODELAGEM DOS EQUIPAMENTOS OTN NO OMNET++	109
5.3.1	Modelagem do canal de serviço	113
5.4	EXTENSÃO DOS MÓDULOS MPLS DO INET	116
5.5	RESULTADOS OBTIDOS.....	119

5.6	CONCLUSÃO	124
6	CONCLUSÃO	125
6.1	RESULTADOS DA DISSERTAÇÃO	126
6.2	TRABALHOS FUTUROS	127
7	BIBLIOGRAFIA	129
APÊNDICE A -	MENSAGENS DE SINALIZAÇÃO.....	133
APÊNDICE B -	PROCESSAMENTO DAS MENSAGENS DE PATH E RESV	136

RESUMO

O crescimento contínuo do tráfego da Internet demanda a cada momento uma nova tecnologia para transportar os dados a velocidades cada vez maiores. As redes *Optical Transport Networks* (OTN), baseadas na multiplexação *Dense Wavelength-Division Multiplexing* (DWDM) e nas já existentes *Synchronous Optical Network* (SONET)/ *Synchronous Digital Hierarchy* (SDH), surgiram como uma tecnologia capaz de responder a esse desafio. No entanto, o crescimento em complexidade das redes OTN com o uso de dispositivos reconfiguráveis implica em custos de operação cada vez mais altos. O *Generalized Multi-protocolo Label Switching* (GMPLS) surge como uma solução de plano de controle a fim de permitir o provisionamento de serviços de forma transparente sobre a rede OTN. Este trabalho tem como objetivo relacionar as recomendações da *International Telecommunications Union* (ITU) sobre redes OTN e as recomendações do *Internet Engineering Task Force* (IETF) relativas ao GMPLS a fim de obter uma solução consistente e genérica de um plano de controle para as redes OTN. Para alcançar o objetivo é realizado um estudo de ambos os padrões OTN e GMPLS, identificando em que ponto há uma conexão entre eles. É analisado como o GMPLS deve representar os recursos da rede OTN e quais as extensões dos protocolos do GMPLS que devem ser utilizadas para o estabelecimento de caminhos ópticos em uma rede OTN. A validação da proposta do plano de controle é feita através do desenvolvimento de modelos de simulação discreta no OMNET++.

Palavras - chave: Redes OTN, Plano de Controle, GMPLS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Planos de uma infra-estrutura de telecomunicações	24
Figura 2-2: modelo funcional de um OXC MxM	26
Figura 2-3: A rede transporte oferece conectividade entre sites da rede cliente	27
Figura 2-4: Exemplo de modelagem funcional utilizando elementos da recomendação G.805.....	30
Figura 2-5: Modelagem funcional da hierarquia óptica de transporte da OTN.....	33
Figura 2-6: fluxo de informação em uma rede OTN.....	36
Figura 2-7: exemplo uma rede WDM unidirecional com um nó OADM.	37
Figura 2-8: Amplificador de linha (modelagem) + ONE transmissor receptor	38
Figura 2-9: funções da adaptação entre as camadas OTS e OMS (a) OTSn/OMSn_A_So, (b)OTSn/OMSn_A_Sk. fonte: (G.798)	40
Figura 2-10: matriz de conexão da camada OCh.	41
Figura 2-11: modelagem de um ROADM unidirecional de grau 2, com n comprimentos de onda	43
Figura 2-12: Estrutura de camadas da OTN.	44
Figura 3-1: Iteração entre os controladores de chamada e de conexão	49
Figura 3-2: Exemplo de rede MPLS	51
Figura 3-3: switches, controladores e canal óptico	56
Figura 3-4: Hierarquia GMPLS dos tipos de comutação.	59
Figura 3-5: Modelos de serviços (a) Modelo de cooperação e (b) modelo de Sobreposição	60
Figura 3-6: Formato Genérico de uma mensagem no RSVP	64
Figura 3-7: Estabelecimento e término de um LSP	65
Figura 3-8: Estabelecimento de LSP's por uma rede multi-região	73
Figura 3-9: Arquitetura de rede para uso do plano de controle	82
Figura 3-10: Estabelecimento de um caminho óptico	83
Figura 4-1: possíveis formas de transmissão por uma rede OTN	87
Figura 4-2: Exemplo de rede OTN sem ONE com conversão O-E-O	89
Figura 4-3: Mapeamento da hierarquia óptica de transporte da OTN	90
Figura 4-4: Implementação do canal de supervisão	94

Figura 4-5: Exemplo de endereçamento dos recursos do plano de controle (em azul) e transporte (em vermelho).....	96
Figura 5-1: Relação hierárquica entre os módulos simples, composto e uma rede no OMNET++. ..	106
Figura 5-2: Comportamento no tempo do envio de mensagens pelos canais do OMNET++	107
Figura 5-3: Sinais e componentes internos do bloco funcional OTSn/OMSn_A_Sk implementados em um módulo simples no OMNET++.	110
Figura 5-4: Modelo de simulação e representação visual de um OXC no OMNET++.	111
Figura 5-5: tempos de transmissão e propagação com ou sem conversão O-E-O nos nós.....	113
Figura 5-6: Modelo de implementação do canal de controle	114
Figura 5-7: Teste realizado dos módulos amplificadores de linha (amplificador) e OXC.....	115
Figura 5-8: MPLS LSR e controlador GMPLS, baseados no RSVP-TE	116
Figura 5-9: Exemplo de alocação de um OCh LSP no OMNET++.	119
Figura 5-10: TED de cada LSR.....	120
Figura 5-11: partes do arquivo de <i>log</i> no estabelecimento de um OCh LSP	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de tecnologias de comutação suportadas pelo MPLS e o GMPLS	54
Tabela 2: Mensagens do protocolo RSVP-TE	63
Tabela 3: Principais resultados obtidos com a simulação do plano de controle GMPLS para redes OTN.....	123

LISTA DE SIGLAS/ACRÔNIMOS

AI - *Adapted Information*

AI_OH - *Adapted Information Overhead*

AI_PLD - *Adapted Information Payload*

AP - *Access Point*

API - *Application Programming Interface*

AS - *Autonomous Systems*

ASON - *Architecture for the Automatically Switched Optical Network*

ATM - *Asynchronous Transfer Mode*

CI - *Characteristic Information*

CP - *Connection Point*

CR-LDP - *Constraint-Routing Label Distribution Protocol*

DAa - *Amplifier-aided Dispersion Accommodation*

DCN - *Data Communications Network*

ECE - *Elemento de Controle de Equipamentos*

ECR - *Elemento de Cálculo de Rotas*

EDFA - *Erbium Doped Fiber Amplifier*

EMR - *Elemento de Manipulação de Requisições*

E-NNI - *External Network-Network Interface*

ERO - *Explicit Route Object*

ETDM - *Electrical Time-Division Multiplexing*

FDM - *Frequency Division Multiplexing*

FEC - *Forward Error Correction*

FEC - *Forwarding Equivalence Class*

FSC - *Fiber-Switch Capable*

GbE - *Gigabit Ethernet*

GFP - *Generic Framing Procedure*

GMPLS - *Generalized Multi-Protocol Label Switching*

G-PID - *Generalized Protocol Identifier*

H-LSP - *LSP Hierárquico*

IDE - *Integrated Development Environment*

IETF - *Internet Engineering Task Force*

I-NNI - *Internal Network-Network Interface*

ISC - *Interface Switching Capability*

IS-IS - *Intermediate System to Intermediate System*

IS-IS-TE - *Intermediate System to Intermediate System – Traffic Engineering*

ITU - *International Telecommunications Union*

L2SC - *Layer-2 Switch Capable*

LC - *Link Connection*

LDP - *Label Distribution Protocol*

LER - *Label Edge Router*

LMP - *Link Management Protocol*

LSA - *opaque Link State Advertisement*

LSC - *Lambda Switch Capable*

LSP - *Label Switched Path*

LSR - *Label Switch Router*

MPLS - *Multi-Protocol Label Switching*

MPLS-TE - *MPLS with Traffic Engineering extensions*

MT – *Multiplier*

NC - *Network Connection*

NED – *NEtwork Description Language*

NGN - *Next-Generation-Networks*

NMC - *Number of Multiplexed Components*

NS-2 - *Network Simulator version 2*

NVC - *Number of Virtual Components*

OA - *Optical Amplifier*

OADM - *Add/Drop Multiplexer*

OAM&P - *Operation, Administration, Maintenance and Provisioning*

OCh - *Optical Channel*

OCh_C - *OCh Connection function*

OCh_CI - *OCh Characteristic Information*

OCh_CP – *OCh Connection Point*

OChr - *Optical Channel with reduced functionality*

OCI - *Open Connection Indication*

ODU - *Optical Channel Data Unit*

O-E-O - *óptico-eléctrico-óptico*

OIF - *Optical Internetworking Forum*

OMS - *Optical Multiplex Section*

OMS_TT_Sk - *OMS Termination Trail Sink function*

OMS_TT_So - *OMS Termination Trail Source function*

OMSn/OCh_A_Sk - *OMS to OCh Adaptation Sink function*

OMSn/OCh_A_So - *OMS to OCh Adaptation Source function*

OMSn_CP - *OMSn Connection Point*

ONE - *OTN Network Element*

OPS - *Optical Physical Section*

OPSn - *Optical Physical Section of order n*

OPU - *Optical Channel Payload Unit*

OSC - *Optical Supervisory channel*

OSPF - *Open Shortest Path First*

OSPF-TE - *Open Shortest Path First – Traffic Engineering*

OTMn[r].m - *Optical Transport Module*

OTN - *Optical Transport Networks*

OTS - Optical Transport Section

OTSn/OMSn_A_Sk - OTS to OMS Adaptation Sink function

OTSn/OMSn_A_So - OTS to OMS Adaptation Source function

OTSn_TT_Sk - OTS Termination Trail Sink function

OTSn_TT_So - OTS Termination Trail Source function

OTU - Optical Transport Unit

OXC - optical CrossConnect

PDU - Protocol Data Unit

PMDC - Polarization Mode Dispersion Compensation

PPP - Point-to-Point Protocol

PSC - Packet Switch Capable

QoS - Quality of Service

ROADM - Reconfigurable Add/Drop Multiplexer

RRO - Recorded Route Object

RSVP - Resource Reservation Protocol

RSVP-TE Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering

SDH - Synchronous Digital Hierarchy

SNC - SubNetwork Connection

SNP - Subnetwork Point

SONET - Synchronous Optical Network

TCM - Tandem Connection Monitoring

TCP - *Termination Connection Point*

TCP - *Transmission Control Protocol*

TDM - *Time-Division Multiplexing*

TE - *Traffic Engineering*

TED - *Traffic Engineering Database*

UDP - *User Datagram Protocol*

UNI - *User Network Interface*

VC - *Virtual Container*

WDM - *Wavelength Division Multiplexing*

1 INTRODUÇÃO

O crescimento contínuo do tráfego da Internet demanda a cada momento uma nova tecnologia para transportar dados a velocidades cada vez maiores. O surgimento de outras fontes de tráfego, como dispositivos móveis, com diferentes requerimentos de QoS (*Quality of Service*), constituem um desafio cada vez maior para a convergência de redes. Neste contexto as tecnologias ópticas de transporte surgiram como uma alternativa para o núcleo das redes dada a sua alta taxa de transmissão.

As primeiras redes ópticas têm como base a transmissão ponto-a-ponto de apenas um sinal óptico por fibra. Em cada terminação da fibra é realizada a conversão óptico-elétrico-óptico (O-E-O) do sinal, e todo o processamento e comutação dá-se no domínio digital, segundo (Maier, 2008). Hoje, as tecnologias *Wavelength-Division Multiplexing* (WDM) permitem um expressivo aumento de largura de banda através da transmissão de mais de um sinal óptico por fibra. Novos equipamentos, como os *Reconfigurable Add/Drop Multiplexers* (ROADM's) (Maier, 2008), permitem realizar a comutação dos sinais clientes, transportados em comprimento de onda específico na fibra, sem a necessidade de uma conversão O-E-O, ou seja, puramente no domínio óptico. A OTN (*Optical Transport Network*) é uma arquitetura da ITU (*International Telecommunication Union*) que busca estender muitas das funcionalidades do SONET/SDH (*Synchronous Optical NETWORK/ Synchronous Digital Hierarchy*) para as redes DWDM (*Dense WDM*), fornecendo uma padronização para os fabricantes de equipamentos DWDM. Segundo (Kartalopoulos, 2008), a OTN também é conhecida como o “*digital wrapper*” devido a sua capacidade transportar qualquer tipo de sinal digital cliente, como um sinal SDH ou Gigabit Ethernet, em seu container óptico.

O crescimento das redes OTN, tanto em tamanho quanto em complexidade dos equipamentos, implica em custos de operação cada vez maiores. O GMPLS (*Generalized Multi-Protocol Label Switching*), formado por um conjunto de protocolos do mundo *Internet Protocolo* (IP), fornece um plano de controle cujo principal objetivo é alocar serviços pelas redes de transporte. O GMPLS utiliza basicamente um protocolo de roteamento para distribuir informações topológicas da rede de transporte e oferecer cálculo de caminhos, e um protocolo de sinalização para alocar

os recursos pelo caminho selecionado. Assim, o GMPLS pode ser usado para estabelecer caminhos ópticos por uma rede OTN.

No entanto, as recomendações do IETF (*Internet Engineering Task Force*) relativas ao GMPLS tratam de forma genérica o plano de transporte, já que o intuito é aplicá-lo às mais variadas tecnologias. Neste sentido, faz-se necessário um estudo mais aprofundado dos processos e protocolos do GMPLS para que sejam usados para controlar o fornecimento de serviços sobre as redes OTN. Além disso, na literatura foram encontradas propostas de plano de controle GMPLS para redes OTN que não levam em conta os padrões da ITU e a arquitetura OTN, como em (Yoon & Kim, 2008), onde os nós da rede OTN são apenas pontos funcionais capazes de realizar ou não a comutação de um comprimento de onda. Assim, não há garantias de que essas soluções sejam genéricas o suficiente para uso em qualquer equipamento OTN que esteja de acordo com as normas da ITU.

1.1 OBJETIVO E METODOLOGIA

Por esses motivos, o presente trabalho tem por objetivo principal propor uma solução de plano de controle GMPLS que permita o estabelecimento de caminhos ópticos pela rede OTN. Esta proposta tem como base as recomendações da ITU e do IETF, a fim de que seja suficientemente genérica para ser aplicada a qualquer equipamento OTN. O objetivo geral deste trabalho é realizar o estudo e o amadurecimento sobre o uso de tecnologias baseadas no IP no mundo das telecomunicações, bem como apresentar formas para transformar uma descrição funcional de uma tecnologia em uma solução para um problema real.

A metodologia de desenvolvimento deste trabalho se divide em três partes. A primeira parte consiste em realizar um estudo das normas da ITU para redes OTN, a fim de entender a relação entre os equipamentos e as normas, como também o estudo das normas relativas ao plano de controle GMPLS, sua arquitetura e protocolos envolvidos. A segunda parte consiste em relacionar as normas da ITU sobre redes OTN e IETF relativas ao GMPLS a fim de obter uma proposta de plano de controle para redes OTN. Por último, é desenvolvido um modelo de simulação para validar a proposta.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho inicia com um estudo sobre as arquiteturas e protocolos das redes OTN e do GMPLS, que servem de embasamento para a proposta de plano de controle.

O capítulo 2 apresenta a arquitetura OTN, bem como os elementos de modelagem necessários para representar funcionalmente uma rede. Neste capítulo é feita uma modelagem dos equipamentos OTN de acordo com as normas da ITU. Essa modelagem é importante para realizar o relacionamento entre os padrões da ITU e IETF, como também na simulação da rede OTN.

O capítulo 3 é dividido em duas partes: a primeira apresenta o GMPLS, os protocolos envolvidos e o seu modo de operação. A segunda parte relaciona o GMPLS com a OTN e apresenta uma proposta de solução de plano de controle com base nos processos descritos na primeira parte, como também na modelagem da rede OTN.

O capítulo 4 apresenta o modelo de simulação criado para validar a proposta de plano de controle. Uma pequena introdução ao simulador é feita, e em seguida são apresentados os modelos de simulação da rede OTN e do GMPLS. Este capítulo termina com os principais resultados da simulação. O capítulo 5 conclui esta dissertação com os resultados do trabalho, assim como sugere trabalhos futuros a fim de abranger assuntos que estiveram fora do escopo.

O apêndice A apresenta o formato das mensagens de sinalização, quais os objetos adotados e seus parâmetros. O apêndice B fornece um diagrama de fluxo do processamento das mensagens de sinalização trocadas durante o estabelecimento de um serviço pela rede de transporte.

2 REDES ÓPTICAS DE TRANSPORTE

Este capítulo tem por objetivo apresentar as principais características das redes OTN, uma evolução das tecnologias de transmissão baseada em um comprimento de onda SONET/SDH para transmissão com vários comprimentos de onda WDM

Inicialmente é feita uma contextualização das redes OTN e do GMPLS a fim indicar o seu relacionamento e o papel de ambos nos sistemas de telecomunicações. Em seguida apresenta-se aqui a arquitetura e os equipamentos típicos de uma rede OTN, assim como uma introdução sobre simulação de redes ópticas.

2.1 PLANOS DE TRANSPORTE, DE CONTROLE E DE GERÊNCIA

Segundo (Farrel & Bryskin, 2006), é interessante decompor os nós da rede em componentes funcionais, permitindo a criação de um modelo arquitetural confiável e de fácil entendimento. Esses componentes funcionais possuem uma relação entre si e podem se comunicar através de mensagens. Por exemplo, um componente funcional pode ter a responsabilidade de gerenciar os nós da rede, e outro componente funcional deve prover as informações necessárias para gerenciar um dispositivo, como um roteador.

Os componentes funcionais que se comunicam entre si para realizar uma tarefa em comum, como a gerência de um roteador do exemplo anterior, são agrupados em um **plano**. Segundo (Farrel & Bryskin, 2006), os componentes funcionais de um sistema de telecomunicações podem ser agrupados em três planos distintos:

- O **plano de transporte**, também conhecido como plano de dados é o plano por onde trafega a carga útil, ou seja, os dados do cliente. É o conjunto de equipamentos que tem como função principal transportar essa informação. Pode ser visualizado com o plano de dados. As redes de transporte, o que inclui a OTN, fazem parte do plano de transporte.
- O **plano de controle** é formado por um conjunto de funcionalidades que atuam no plano de transporte para que os dados sejam transportados de

maneira eficiente e inteligente. Enquanto o Plano de Transporte “transporta” os dados, o plano de controle diz como esses dados devem ser transportados. O plano de controle pode ser responsável por realizar operações de configuração automática, alocação de recursos, realizar roteamento em caso de falhas, e outras decisões com certo nível de automação. O GMPLS é hoje o principal representante do mundo IP de solução para o plano de controle (ver seção 3.1).

- O **plano de gerência** fornece uma interface homem-máquina com todos os outros planos, para que o administrador da rede possa tomar decisões que afetem a operação de todos os planos.

As informações relativas aos planos de controle e gerência trafegam pela *Data Communications Network* (DCN), uma rede logicamente independente da rede OTN que transporta os dados do cliente, mas que pode fisicamente compartilhar recursos com a rede de transporte.

Os três planos não trabalham isoladamente, como mostra a Figura 2-1. Entre eles encontram-se as seguintes interações:

- **Plano de gerência e plano de transporte:** O plano de gerência contém um modelo do plano de transporte e uma base com informações estatísticas sobre o estado dos recursos, as quais podem ser utilizadas pelo operador da rede. O plano de gerência pode realizar operações de monitoramento, configuração, alocação de recursos e manutenção do plano de transporte. A gerência de recursos é responsável por garantir que o plano de gerência não altere os recursos que estão sobre o domínio do plano de controle, e vice-versa.
- **Plano de controle e plano de transporte:** Assim como o plano de gerência, o plano de controle possui um modelo de representação do plano de transporte, sem a obrigatoriedade de utilizar o mesmo modelo do plano de gerência. Em linhas gerais, o plano de controle é responsável pela alocação, configuração e manutenção dos recursos do plano de transporte. Embora pareça que muitas das funcionalidades dos planos de controle e gerência sejam iguais, a diferença está no fato de que o plano de gerência está focado

na interação entre o homem e a rede, enquanto que o plano de controle está focado na automação das tarefas, com o mínimo de interferência humana.

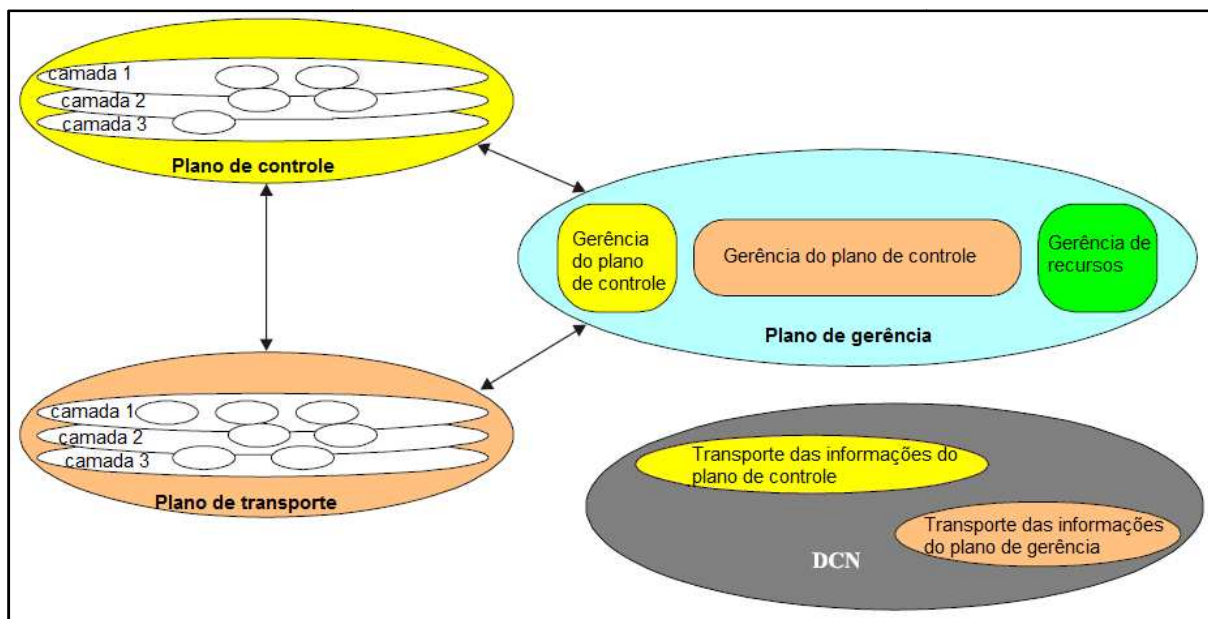


Figura 2-1: Planos de uma infra-estrutura de telecomunicações

Fonte: (ITU-T, G.8080, 2006)

Por exemplo, a alocação de um recurso no plano de controle pode ser feita automaticamente utilizando algum algoritmo e um mecanismo de tomada de decisão, sem a necessidade da intervenção humana, nem mesmo para decidir se deve ou não alocar um recurso. Já na alocação realizada pelo plano de gerência é necessário que o operador da rede indique que recursos devem ser alocados, o que muitas vezes pode ser inviável, dada a complexidade dos sistemas.

- **Plano de gerência e plano de controle:** Cada componente do plano de controle pode ter uma interface de gerência para fins de monitoração e configuração, assim como na relação plano de gerência e o plano de transporte. Assim, é possível alterar o comportamento interno do plano de controle via configuração. Por exemplo, é possível dizer ao plano de controle qual algoritmo de roteamento usar para escolher qual será o percurso usado na transmissão dos dados pelo plano de transporte.

2.2 EVOLUÇÃO DAS REDES ÓPTICAS

Segundo (Ramaswami & Sivarajan, 2002), as redes ópticas podem ser divididas primordialmente em duas gerações. Na primeira geração, as redes ópticas eram essencialmente usadas para transmissão e aumento da capacidade. A fibra óptica é um meio que provê baixa taxa de erro de bits e alta capacidade de transmissão em comparação com outras tecnologias. Todas as operações de comutação e outras funções inteligentes das redes dessa geração são feitas eletronicamente, a partir de uma conversão O-E-O em cada elemento de rede. Exemplos dessa primeira geração são o SONET, tecnologia usada principalmente na América do Norte, e o SDH, essencialmente similar ao SONET e utilizado na Europa e Ásia. Segundo (Ilyas & Mouftah, 2003), SONET/SDH é uma interface (não uma rede) que agrega todo o tráfego gerado segundo uma hierarquia elétrica de multiplexação no tempo (ETDM - *Electrical Time-Division Multiplexing*).

As redes da primeira geração apresentam alguns limites no que se refere ao crescimento da largura de banda. Criar multiplexadores para taxas de transmissão muito altas se confronta com a complexidade do sistema eletrônico para gerar esse sinal. Além disso, efeitos como a dispersão modal tendem a piorar a medida que a taxa de transmissão aumenta. Nesse contexto surgiu a WDM, similar à *Frequency Division Multiplexing* (FDM), e consiste em transmitir dados simultaneamente em diferentes comprimentos de onda.

Recentemente, pesquisadores e fabricantes têm mostrado que as redes ópticas podem fornecer funções mais complexas do que apenas uma conexão ponto-a-ponto, incorporando operações de comutação e roteamento na camada óptica. Os principais elementos de rede que adicionam essas funções são os *Optical Add/Drop Multiplexers* (OADM's), *Reconfigurable Add/Drop Multiplexers* (ROADM's) e os *Optical CrossConnects* (OXC's). Basicamente, esses equipamentos realizam a comutação de um comprimento de onda de uma determinada fibra de entrada do elemento de rede para uma fibra de saída, como pode ser visto na representação funcional da Figura 2-2. O demultiplexador é responsável por separar os comprimentos de onda em uma das N portas, enquanto que o Multiplexador une todos os comprimentos de onda em uma mesma fibra. A matriz de conexão é

responsável por realizar a comutação dos M comprimentos de onda entre as N portas de entrada e saída. A principal diferença os OADM's e os ROADM's/OXC's é que os OADM's possuem uma matriz de conexão estática, definida em tempo de projeto, enquanto que os ROADM's e OXC's permitem alterá-la via configuração. Para o sinal cliente a rede óptica é transparente, fornecendo um caminho óptico entre terminais. Essas redes correspondem à segunda geração de redes ópticas.

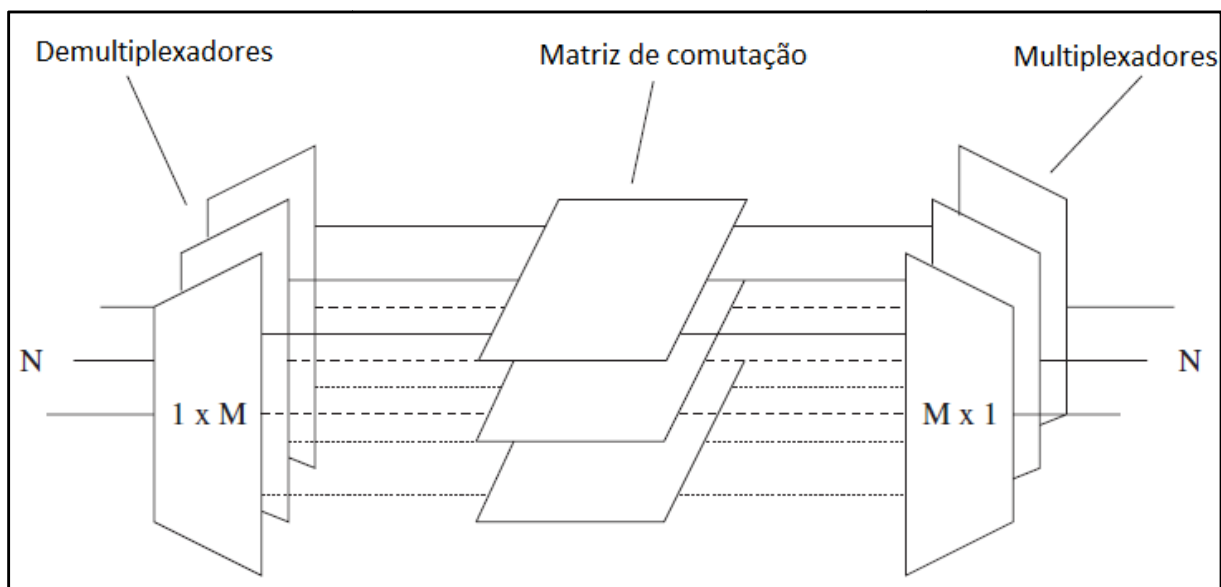


Figura 2-2: modelo funcional de um OXC $M \times M$

Fonte: (Maier, 2008)

A camada óptica torna-se uma entidade complexa que executa diversas funções, como multiplexação, comutação e roteamento dos comprimentos de onda, assim como o monitoramento e gerenciamento da rede em diversos níveis. A fim de delinear essas funções bem como a arquitetura da camada óptica, a ITU criou a OTN, que busca incorporar mecanismos de monitoramento e localização de falhas similares aos das redes ópticas da primeira geração na camada óptica, além de padronizar uma hierarquia de multiplexação digital TDM baseada no SONET/SDH.

2.3 REDES ÓPTICAS DE TRANSPORTE (OTN)

A OTN representa uma evolução das redes de segunda geração acrescidas de funções de uma padronização para *Operation, Administration, Maintenance and Provisioning* (OAM&P) e acrescida de uma camada de multiplexação TDM. Em

outras palavras, uma rede OTN é constituída de equipamentos típicos DWDM que implementam os mecanismos para verificação de falhas descritos nas normas da ITU-T.

A ITU, na recomendação G.805 (ITU-T, G.805, 2000), define transporte como “o processo funcional de transferência de informação entre diferentes localizações”. A informação transferida é, na verdade, um sinal cliente, advindo de uma rede cliente. Por exemplo, uma rede WDM pode ser a rede de transporte de um sinal cliente SDH. Para a rede cliente, a rede de transporte age de forma transparente, ou seja, apenas oferecendo conectividade. Na Figura 2-3 tem-se um exemplo dessa interação.

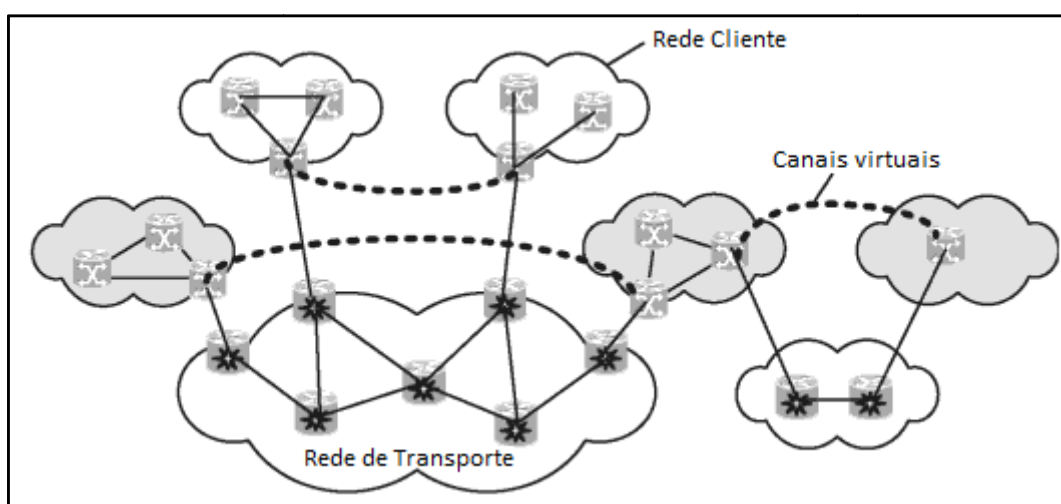


Figura 2-3: A rede transporte oferece conectividade entre sites da rede cliente

A OTN inclui funcionalidades de transporte, multiplexação, roteamento, supervisão e sobrevivência do sinal cliente no domínio óptico e elétrico. Na literatura OTN também é conhecido como o “*digital wrapper*” devido a sua capacidade transportar qualquer tipo de sinal digital cliente em seu container óptico. Esta seção apresenta as principais recomendações da ITU-T relativa a redes OTN, assim como arquitetura e a modelagem dos equipamentos de uma rede OTN.

2.3.1 Recomendações do ITU

A ITU define uma série de recomendações a fim de padronizar a OTN. As recomendações citadas nesta seção constituem o núcleo da arquitetura OTN.

A recomendação G.805 (ITU-T, G.805, 2000) descreve uma arquitetura genérica de redes de transporte, que serve como base para a modelagem de todas as tecnologias de transporte, como *Asynchronous Transfer Mode* (ATM), SDH e OTN. Uma série de componentes arquiteturais genéricos é definida para permitir uma descrição funcional de uma rede transporte (ver seção 2.3.3).

A recomendação G.872 (ITU-T, G.872, 2001) apresenta a arquitetura OTN com base na modelagem fornecida na recomendação G.805, estruturando toda a rede em camadas, as quais possuem uma funcionalidade específica dentro da arquitetura OTN.

A recomendação G.709 (ITU-T, G.709, 2003) define as interfaces OTN com base em uma hierarquia de multiplexação digital e óptica, especificando as taxas de bits, a estrutura dos frames e o formato dos cabeçalhos de cada camada.

A recomendação G.798 (ITU-T, G.798 , 2006) define uma série de blocos funcionais que permitem a modelagem de um elemento de rede óptica. Os blocos funcionais baseiam-se na hierarquia de camadas da recomendação G.872 e nos esquemas de multiplexação apresentados na recomendação G.709. Nessa recomendação também é detalhado como são gerados os alarmes que podem ser utilizados pela gerência para realizar o isolamento de falhas.

2.3.2 Serviços Oferecidos

Segundo (ECI Telecom, 2008), OTN oferece diversos aprimoramentos sobre as redes SONET/SDH:

- Escalabilidade aprimorada: SONET/SDH possuem uma interface que multiplexa fluxos de dados de baixa taxa em fluxos maiores utilizando uma hierarquia TDM no domínio eletrônico. No entanto, para transportar um serviço de 10 GbE , por exemplo, é necessário realizar uma série de operações de multiplexações que levam a uma grande quantidade de *overhead*, além da complexidade de processamento, gerência e operação. A OTN define um esquema de multiplexação similar ao do SONET/SDH, porém

transporta dados nativamente a taxas de 2.5, 10 e 40 Gbps (100 Gbps já está em estudo para ser padronizado) com uma quantidade muito menor de overhead.

- Transporte transparente do sinal cliente: Sinais SONET/SDH são encapsulados diretamente dentro da OTN, enquanto que em outras tecnologias de transmissão utiliza-se o *Generic Framing Procedure* (GFP). A OTN pode transportar de forma transparente qualquer um desses tipos de dados, sem que haja terminação do sinal cliente em cada elemento de rede, tornando possível o transporte sem alterações no formato, taxa de bits e *clock* intrínsecos do sinal.
- Mecanismo aprimorado de *Forward Error Correction* (FEC): O SONET/SDH já possui um mecanismo de FEC, porém utiliza alguns bytes do cabeçalho que não possuem uso definido para transportar a informação de FEC. A OTN possui um campo maior e utiliza o algoritmo *Reed-Solomon* (ITU-T, G.709, 2003). Isso permite que seja possível alcançar distâncias maiores de transmissão sem regeneração, uma vez que o algoritmo é capaz de corrigir uma quantidade maior de bits errados.
- Melhor nível de *Tandem Connection Monitoring* (TCM): Redes OTN provêm suporte a até seis níveis de TCM independentes (contra um nível suportado por SONET/SDH), tornando possível o monitoramento de vários segmentos de caminhos em múltiplos domínios administrativos distintos.
- OAM&P (*Operation, Administration, Maintenance&Provisioning*): A rede OTN provê funções de operação, administração, manutenção e aprovisionamento, adaptando os mecanismos já existentes no SONET/SDH para as camadas elétricas da rede OTN.

2.3.3 Componentes Arquiteturais de uma rede de transporte genérica

A recomendação G.805 (ITU-T, G.805, 2000) apresenta uma série de componentes arquiteturais que compõem uma rede transporte genérica, os quais são utilizados para modelar a arquitetura OTN. Para o entendimento do presente trabalho faz-se necessário entender cada um desses componentes e como eles podem ser usados na modelagem de uma rede de transporte.

A arquitetura funcional genérica de uma rede de transporte é baseada em uma estrutura de camadas, no modelo cliente-servidor. A camada servidora é responsável por transportar os dados da camada cliente.

O transporte das informações em uma camada é feito através das **trilhas** e **conexões**. De maneira geral, as conexões são responsáveis por transferir os dados, enquanto que a trilha é responsável por monitorar as conexões no início e no fim do caminho. Sendo assim, uma trilha representa a transferência monitorada fim-a-fim das informações da camada, a qual pode ser suportada por diversas conexões que transportam a informação.

Um exemplo de modelagem funcional da camada cliente e servidora pode ser visto na Figura 2-4. Suponha a transmissão de um sinal SDH por uma rede. A camada cliente da figura representa o SDH, enquanto que a camada servidora é a primeira camada da rede OTN. O SDH precisa gerenciar se a rede OTN está transmitindo os dados corretamente. Essa gerência é feita pelas terminações de trilha, representadas pelos triângulos invertidos da Figura 2-4. A terminação de trilha no lado fonte da camada cliente insere um cabeçalho daquela camada nos dados que devem ser transportados, enquanto a terminação de trilha no lado destino retira esse cabeçalho.

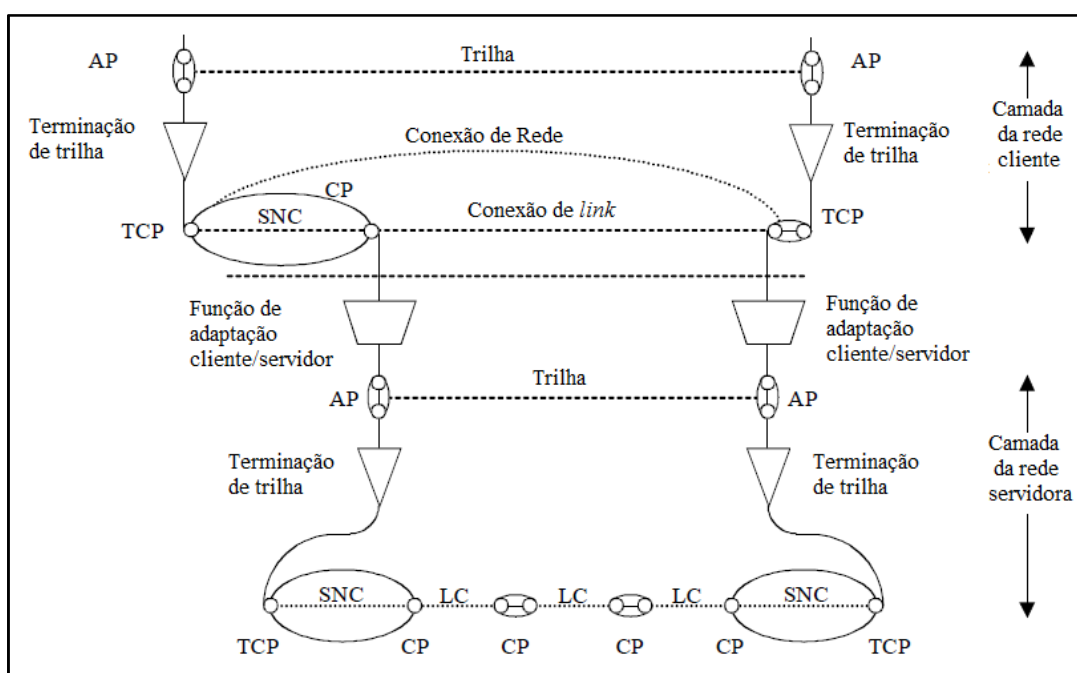


Figura 2-4: Exemplo de modelagem funcional utilizando elementos da recomendação G.805

Fonte: (ITU-T, G.805, 2000)

Existem dois tipos de informações trocadas entre as entidades da recomendação G.805 (ITU-T, G.805, 2000). A informação característica (CI - *Characteristic Information*) é a informação completa de uma camada, constituída da carga útil mais o cabeçalho, ou seja, é a saída de uma terminação de trilha na origem da transmissão, ou a entrada de uma terminação de trilha no destino. Essa é a informação que é passada da camada cliente para a camada servidora, ou seja, a camada servidora é responsável por transportar a CI da camada cliente. Na camada servidora a CI passa por um processo de adaptação e torna-se uma informação adaptada (AI - *Adapted Information*).

A informação característica ao sair da terminação de trilha do lado fonte é conduzida para o *Termination Connection Point* (TCP). Os TCP's sempre estão ligados diretamente a uma terminação de trilha. Uma conexão de rede (NC - *Network Connection*) é uma associação entre dois TCP's e tem como função transferir os dados da terminação de trilha, como pode ser visto na Figura 2-4. Uma NC ainda é uma abstração funcional e é implementada por conexões de enlace (LC - *Link Connection*), ou conexões de subrede (SNC - *SubNetwork Connection*). Uma LC é o componente mínimo de uma camada, indivisível, enquanto que uma SNC é um particionamento horizontal daquela camada, constituído internamente por LC's e outras subredes. No exemplo da camada cliente ser o SDH, cada LC poderia ser a conexão ponto-a-ponto entre dois elementos de rede do SDH, entre a origem da transmissão e o destino. O ponto de conexão (CP - *Connection Point*) é o ponto de referência que pode estar ligando uma SNC a uma LC, ou uma LC a outra LC. Uma SNC representa a conexão fim-a-fim por um subdomínio dentro da rede SDH.

É na LC que existe a ligação entre a camada cliente e a servidora. Cada LC da camada cliente é transportado por uma instância da camada servidora. No exemplo, uma conexão ponto-a-ponto SDH (um LC) pode estar passando por uma rede OTN, porém isso é transparente ao SDH. A informação característica da camada cliente é então passada pelo CP à função de adaptação da camada servidora, representada pela figura do trapézio. A função de adaptação é responsável por realizar as principais funções daquela camada, adaptando a informação característica da camada cliente para ser transportada pelas trilhas da camada servidora. Por exemplo, se a camada servidora do SDH for a *Optical Channel Data Unit* (ODU) (ver seção 2.3.4), então essa função de adaptação irá realizar a multiplexação TDM juntamente

com outros sinais que estão passando pela rede OTN. A função de adaptação tem como entrada a informação característica da camada cliente, e como saída a informação adaptada da camada servidora. Uma função de adaptação está ligada a terminação de trilha da mesma camada pelo ponto de acesso (*AP - Access Point*), por onde é transferida a informação adaptada.

As terminações de trilha e os outros elementos da camada servidora possuem as mesmas funcionalidades que os elementos equivalentes da camada cliente. Observe na Figura 2-4 que na camada servidora existem diversos LC's, reforçando o fato de que embora para o SDH exista apenas uma conexão ponto-a-ponto entre dois CP's, na camada servidora OTN pode existir uma rede muito mais complexa do que a vista pelo SDH.

2.3.4 Estrutura de Camadas

A ITU modela na recomendação G.872 (ITU-T, G.872, 2001) a arquitetura OTN em uma estrutura de camadas, as quais são divididas de acordo com as diferentes funcionalidades providas pela OTN. Essas funcionalidades são descritas utilizando as entidades e regras apresentadas na recomendação G.805 (ITU-T, G.805, 2000). As camadas da rede OTN são divididas em duas hierarquias, uma responsável pela parte óptica e outra pela parte digital da transmissão.

As camadas relativas a hierarquia óptica de transporte da OTN são apresentadas na Figura 2-5, que são: *Optical Channel layer (OCh)*, *Optical Multiplex Section layer (OMS)* e *Optical Transport Section (OTS)*.

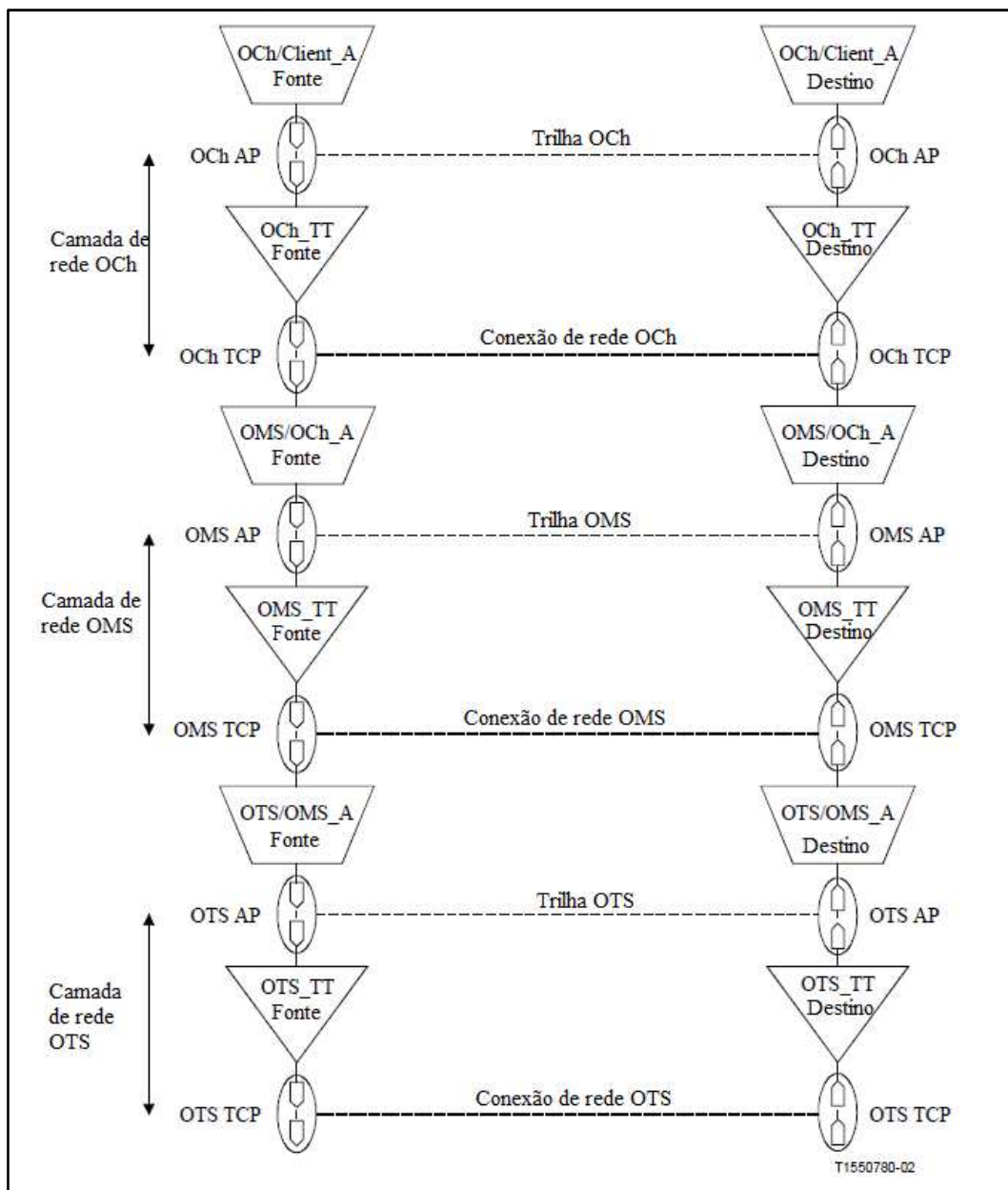


Figura 2-5: Modelagem funcional da hierarquia óptica de transporte da OTN.

Fonte: (ITU-T, G.872, 2001)

A camada OCh é responsável por fornecer um caminho óptico para transportar o sinal cliente pela rede OTN. Esse caminho está entre duas terminações ópticas, uma na fonte realizando a conversão do sinal elétrico para óptico e outra no final da trilha realizando a conversão do sinal óptico para elétrico.

A camada OMS é responsável por multiplexar diversos comprimentos de onda, cada um transportando um OCh em uma fibra.

A camada OTS é a responsável por gerar o canal de supervisão e transmiti-lo juntamente com o sinal multiplexado proveniente da camada OMS.

Embora as três camadas da parte óptica realizem as principais funcionalidades de transporte da OTN, existem casos em que é impossível produzir uma rede puramente óptica. Regeneradores 3R (*Reamplification, Reshaping and Retiming*) são muitas vezes necessários na transmissão a longas distâncias devido às restrições da camada óptica. Além disso, segundo a recomendação G.872 (ITU-T, G.872, 2001, p. 32), nem todos os requerimentos de gerenciamento podem ser satisfeitos pelos mecanismos providos na camada óptica como, por exemplo, uma avaliação aprofundada da qualidade do sinal.

Por esses motivos a recomendação G.709 (ITU-T, G.709, 2003) implementa o canal óptico através do uso do envio de um quadro digital com um cabeçalho que suporta os requerimentos de gerência apresentados na recomendação G.872 (ITU-T, G.872, 2001). Na recomendação G.709 (ITU-T, G.709, 2003) é definida a hierarquia digital de transporte da OTN, a qual é dividida em camadas similares as utilizadas no SONET/SDH. São especificados os formatos dos quadros, as taxas de transmissão e os mecanismos utilizados para realizar o mapeamento dos diferentes tipos de sinal cliente em um quadro OTN.

A parte digital da rede OTN é constituída de três tipos de *Protocol Data Unit* (PDU): *Optical Channel Payload Unit* (OPU), *Optical Channel Data Unit* (ODU) e *Optical Transport Unit* (OTU).

Ao receber um sinal cliente, ele é primeiro mapeado no quadro OPU, onde são feitas as adaptações necessárias para o transporte pela rede OTN. O mapeamento é diferente de um simples encapsulamento, como ocorre nas redes baseadas na arquitetura TCP/IP, pois realiza operações de justificação para ajuste da taxa de transmissão. Por exemplo, se a rede OTN transporta um sinal cliente TDM com uma taxa de transmissão um pouco diferente da taxa de transmissão fornecida pelo quadro OPU, as operações de justificação garantem que o sinal transmitido, ao ser entregue no destino, tenha a taxa de transmissão da rede cliente, e não da rede OTN.

Em seguida, o quadro OPU, constituído pelo sinal cliente mais o cabeçalho é passado para a camada ODU, que oferece um caminho digital fim-a-fim para o sinal cliente. O cabeçalho da ODU é similar ao *path overhead* do SONET/SDH, que provê as funcionalidades de multiplexação TDM, proteção, supervisão fim-a-fim do caminho, TCM entre outras funcionalidades de monitoração da qualidade do sinal.

A camada OTU condiciona o quadro ODU para ser transportado pelo canal óptico, através dos campos de alinhamento de quadro e de FEC do cabeçalho, além dos campos relativos a gerência da conexão. Dessa forma, as terminações de uma trilha ODU coincidem com as terminações de uma trilha OCh, uma vez que ambas terminam onde há conversão O-E-O.

A Figura 2-6 apresenta como é o fluxo de informação entre as camadas. Nas PDUs, ou seja, os quadros das camadas digitais, o caractere “k” representa as diferentes taxas de transmissão suportadas. Por exemplo, k=1 indica taxa de 2.5 Gbps, ou seja, permite transportar um sinal cliente próximo de 2.5 Gbps (não exatamente 2.5 devido ao *overhead*). Já nas camadas ópticas, o caractere “n” indica o número de comprimentos de onda que estão sendo carregados na CI daquela camada. Segundo a recomendação G.709 (ITU-T, G.709, 2003), o *Optical Transport Module-n* (OTM-n) representa a estrutura de informação utilizada pelas interfaces ópticas da OTN. Por exemplo, OTM-16.2 significa que há dezesseis comprimentos de onda de 10 Gbps (m=2 indica a taxa de transmissão de cada comprimento de onda). Outra característica importante da OTN é que o overhead associado às camadas ópticas é transportado pelo *Optical Supervisory Channel* (OSC), um comprimento de onda dedicado que é multiplexado na camada OTS juntamente com os comprimentos de onda que transportam os “n” OTUK's.

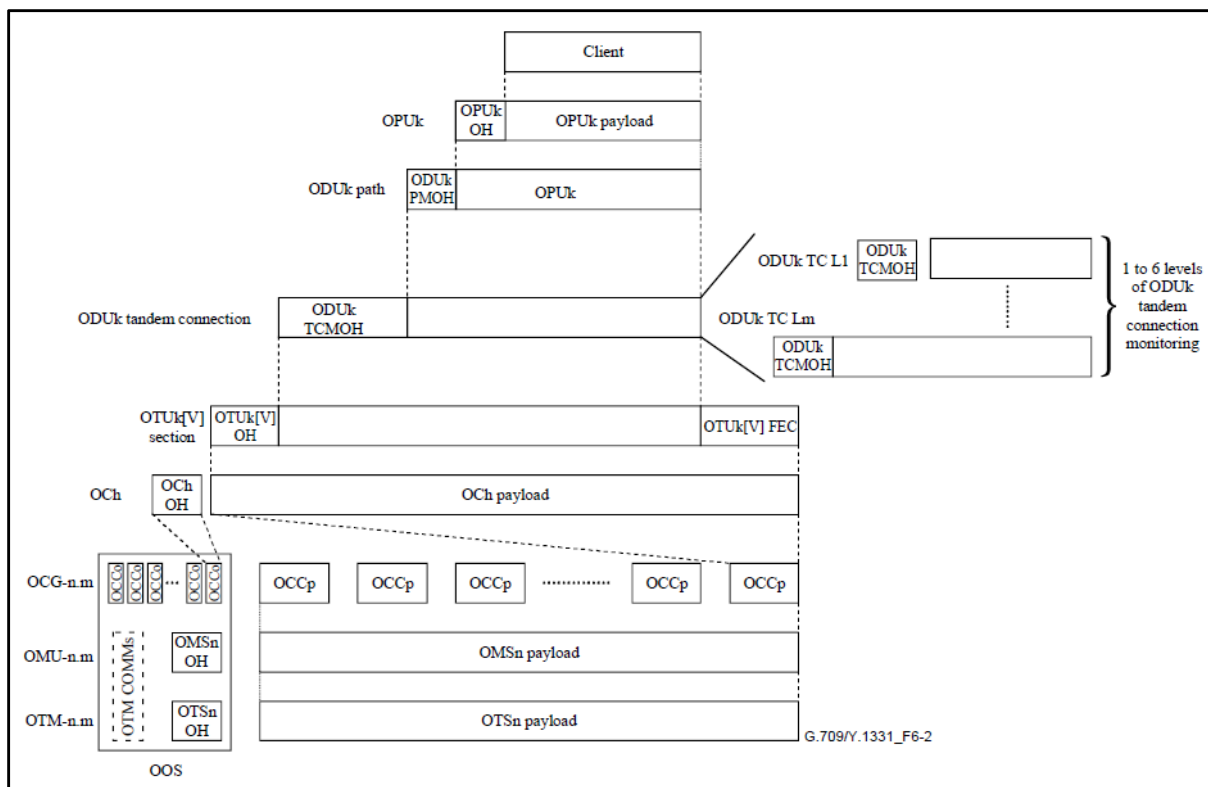


Figura 2-6: fluxo de informação em uma rede OTN

Fonte: (ITU-T, G.709, 2003)

2.3.5 Equipamentos OTN

Embora as recomendações da ITU apresentem uma descrição funcional de uma rede óptica de transporte, um OTN *Network Element* (ONE) é formado por um conjunto de componentes físicos que implementam as funções descritas nas normas. Na Figura 2-7, multiplexadores, amplificadores, lasers e chaves ópticas são combinados na construção de uma rede WDM.

Os lasers e os moduladores são responsáveis por realizar a conversão óptico/elétrico, transmitindo a informação desejada em um comprimento de onda específico. Esses sinais são então enviados a um multiplexador que “agrupa” os diferentes comprimentos de onda em uma única fibra. Os amplificadores ópticos (OA - *Optical Amplifiers*) são utilizados para amplificar o sinal WDM antes de enviá-los pela fibra.

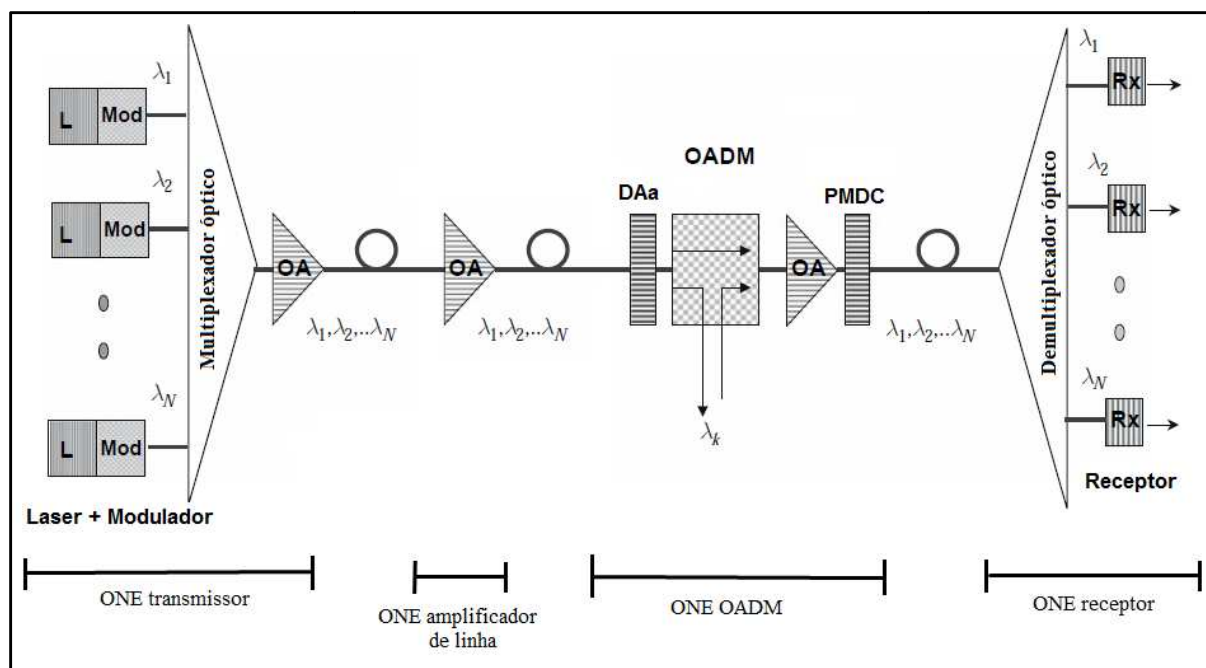


Figura 2-7: exemplo uma rede WDM unidirecional com um nó OADM.

fonte: (Kartalopoulos, 2008)

Após a transmissão do ONE transmissor, o módulo OADM é capaz de retirar um dos comprimentos de onda de entrada, λ_k no exemplo da Figura 2-7, e inserir outro sinal óptico com o mesmo comprimento de onda. Os módulos *Amplifier-aided Dispersion Accommodation* (DAA) e o *Polarization Mode Dispersion Compensation* (PMDC) são equipamentos utilizados para amenizar os efeitos de dispersão na fibra (Ramaswami & Sivarajan, 2002). No exemplo, o ONE OADM é um OADM unidirecional de grau 2, pois existem duas portas unidirecionais de transmissão com outros ONE's. As portas de ADD/DROP não entram na contagem dos graus, seja de um OADM, ROADM ou OXC.

Uma questão que se apresenta é: como modelar os equipamentos reais utilizando os elementos arquiteturais apresentados nas recomendações da ITU?

Essa modelagem pode ser feita através da análise da função que o equipamento tem na rede e das funções providas por cada camada da OTN. Por exemplo, na Figura 2-7 o ONE amplificador de linha unidirecional tem como função principal amplificar o sinal óptico de entrada, de todos os comprimentos de onda com exceção do canal de serviço. Por ser um elemento de rede puramente óptico e não realizar as funções de (de)multiplexação ou conversão O-E-O, relativas a camada OMS e OCh, respectivamente, o amplificador de linha implementa apenas a camada

OMS. Por outro lado, um ONE transmissor gera e modula os sinais digitais de diferentes clientes em um respectivo comprimento de onda, e depois realiza a multiplexação desses sinais. Por isso, o ONE transmissor implementa as camadas OCh e OMS, mas apenas no lado fonte (*source*). Na Figura 2-8 tem-se um exemplo de descrição funcional de uma rede, utilizando os elementos arquiteturais da recomendação G.872 (ITU-T, G.872, 2001), formada por um ONE transmissor enviando para um ONE receptor e que possui apenas um estágio de amplificação entre eles.

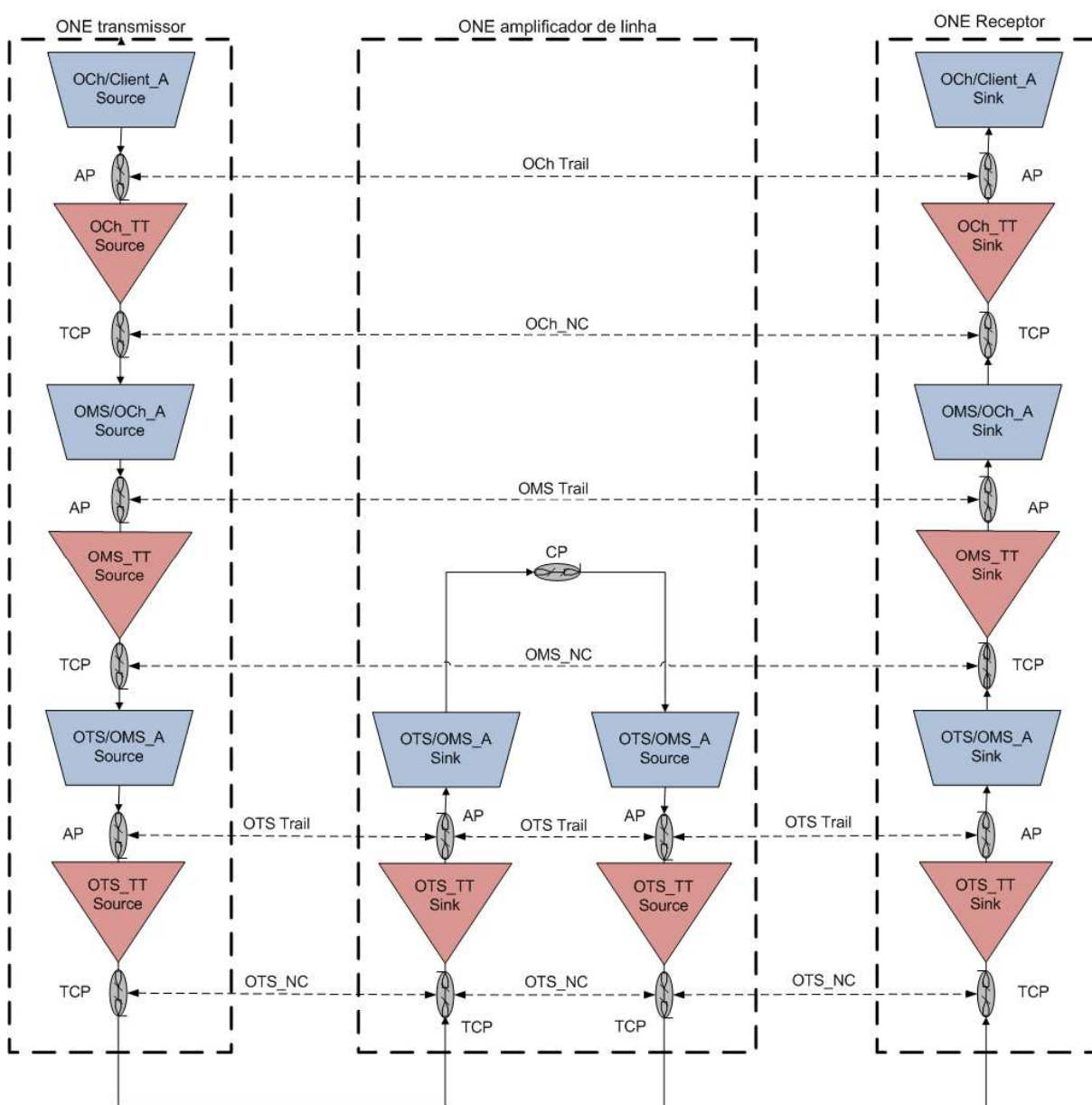


Figura 2-8: Amplificador de linha (modelagem) + ONE transmissor receptor

O ONE receptor é modelado assim como o ONE transmissor, porém com os processos do lado destino (*sink*). As funções de adaptação nos ONE's transmissor e receptor dependem de que tipo de sinal digital cliente a rede está transportando. A camada OCh pode transportar um quadro OTU, assim como um sinal proveniente de outra tecnologia, como GbE ou SONET/SDH. Não há a obrigatoriedade de se utilizar as camadas digitais da OTN para o transporte dos dados.

Independente do elemento de rede OTN, sempre há juntamente com a terminação de trilha de uma camada a função de adaptação com a camada cliente. Enquanto a terminação de trilha tem como função monitorar a camada servidora, é a função de adaptação que implementa as principais funcionalidades de cada camada. A Figura 2-9 apresenta o detalhamento das funções de adaptação relativas a fonte (*source*) e destino (*sink*) entre as camadas OTS e OMS. Através da análise dos elementos internos de cada bloco funcional é possível encontrar as funcionalidades que estão ligadas com alguns dos principais componentes de uma rede óptica. Tracejado na Figura 2-9, o bloco "OA, DAa" no *OTS to OMS Adaptation Source function* (OTS_n/OMS_n_A_So) e o "OA, DAa, PMDC" no *OTS to OMS Adaptation Sink function* (OTS_n/OMS_n_A_Sk) representam alguns dos equipamentos apresentados na Figura 2-7, responsáveis pelo processo de amplificação. O tracejado indica que esses componentes são opcionais, onde podem ser utilizados todos, alguns ou nenhum desses componentes. Por exemplo, no ONE amplificador de linha só existe o componente OA, responsável pela amplificação, enquanto não existem os componentes DAa ou PMDC, responsáveis pela correção dos efeitos da dispersão. Além disso, por existir apenas um componente físico que implementa essa função de amplificação, por exemplo um amplificador *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA), então apenas um dos OA's dos dois blocos deve ser escolhido, por exemplo, o AO do bloco OTS_n/OMS_n_A_So.

funcional. Como e onde implementar essas funcionalidades é uma decisão deixada para os fabricantes de equipamentos OTN.

Na recomendação G.798 (ITU-T, G.798 , 2006) é adicionado à modelagem a função de conexão, existente nas camadas OCh e ODU, que tem como função fazer a ligação entre diferentes pontos de conexão. Como mostra a Figura 2-10, o *OCh Connection function* (OCh_C) é implementado internamente por uma matriz de conexão que, dependendo das ligações, pode oferecer funções de roteamento e proteção óptica para um *OCh Characteristic Information* (OCh_CI), ou seja, para um canal óptico.

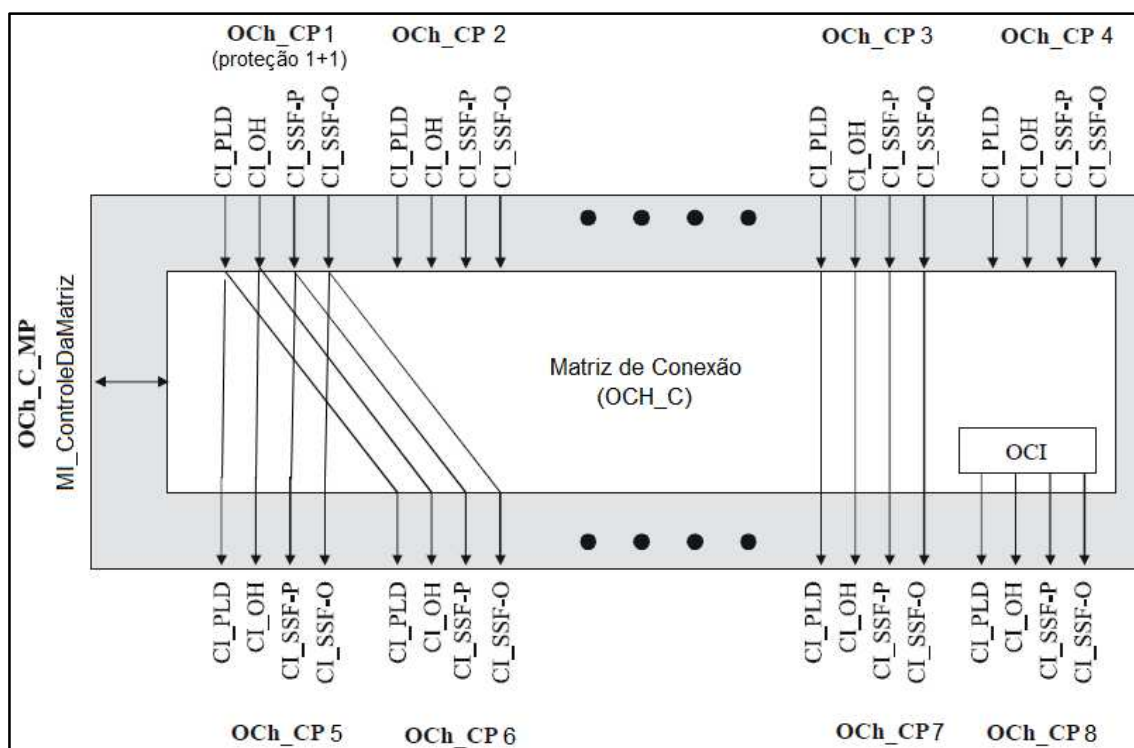


Figura 2-10: matriz de conexão da camada OCh.

fonte: (ITU-T, G.798 , 2006)

No exemplo da Figura 2-10, para fornecer um mecanismo de proteção 1+1 à informação característica do ponto de conexão 1 (OCh_CP1), a matriz de conexão realiza a duplicação da carga útil CI_PLD, do cabeçalho CI_OH e dos sinais utilizados nos mecanismos de isolamento de falhas da OTN. Esse sinal é então enviado para fibras diferentes através dos OCh_CP5 e OCh_CP6.

Em geral, os lasers nos transmissores sempre estão ligados, até mesmo quando não há nenhuma informação sendo transmitida. Por isso, em uma rede OTN, um

comprimento de onda, quando não está sendo usado para o transporte da informação do cliente, deve transmitir uma informação nula. O *Open Connection Indication* (OCI) é responsável pela geração do sinal nulo.

Quanto à modelagem do ONE OADM, implementa-se as camadas OTS e OMS, pois é necessário demultiplexar o sinal WDM antes de fazer o roteamento do sinal. Porém, não se implementa a camada OCh pois o OADM não é uma terminação digital. A Figura 2-11 representa a modelagem de um OADM de grau 2 unidirecional, apresentado na Figura 2-7, e mostra em detalhes as ligações entre o OCh_C e as funções de adaptação. O sinal WDM entra pela porta *LINE IN* e é demultiplexado na função de adaptação da camada OMS com a OCH (OMS_n/OCh_A_Sk). Nesse equipamento, a operação de *DROP* é representada pela conexão na matriz entre o ponto de conexão CP11, que transporta o primeiro comprimento de onda do sinal proveniente da porta *LINE IN*, e o CPd1, relativo a porta de *DROP* do OADM. No mesmo comprimento de onda é inserido então um sinal proveniente da porta *ADD*. No segundo comprimento de onda, proveniente do ponto de conexão CP12, é realizada uma operação de *Pass-through*, ou seja, este canal óptico não retirado do sinal WDM é direcionado diretamente da porta *LINE IN* para a porta *LINE OUT*.

Os ROADMs e OXC's são modelados da mesma forma que o OADM, através das camadas OTS, OMS e da função de conexão OCh_C. O diferencial na modelagem é que a matriz de conexão dos ROADMs ou OXC's é reconfigurável, ou seja, é possível a qualquer momento mudar o ponto de conexão de saída de um OCh_Ci. Por exemplo, em um ROADM de grau 2, é possível, via configuração, alterar o comprimento de onda que é retirado pela porta *DROP*. Já em um OADM, as conexões da matriz são conexões fixas, definidas de acordo com a estrutura física do OADM, e não podem ser alteradas por simples configuração. Além disso, um OXC não possui as portas de *ADD* ou *DROP*, realizando apenas a comutação dos *n* comprimentos de onda entre as diversas portas *LINE IN* e *LINE OUT*.

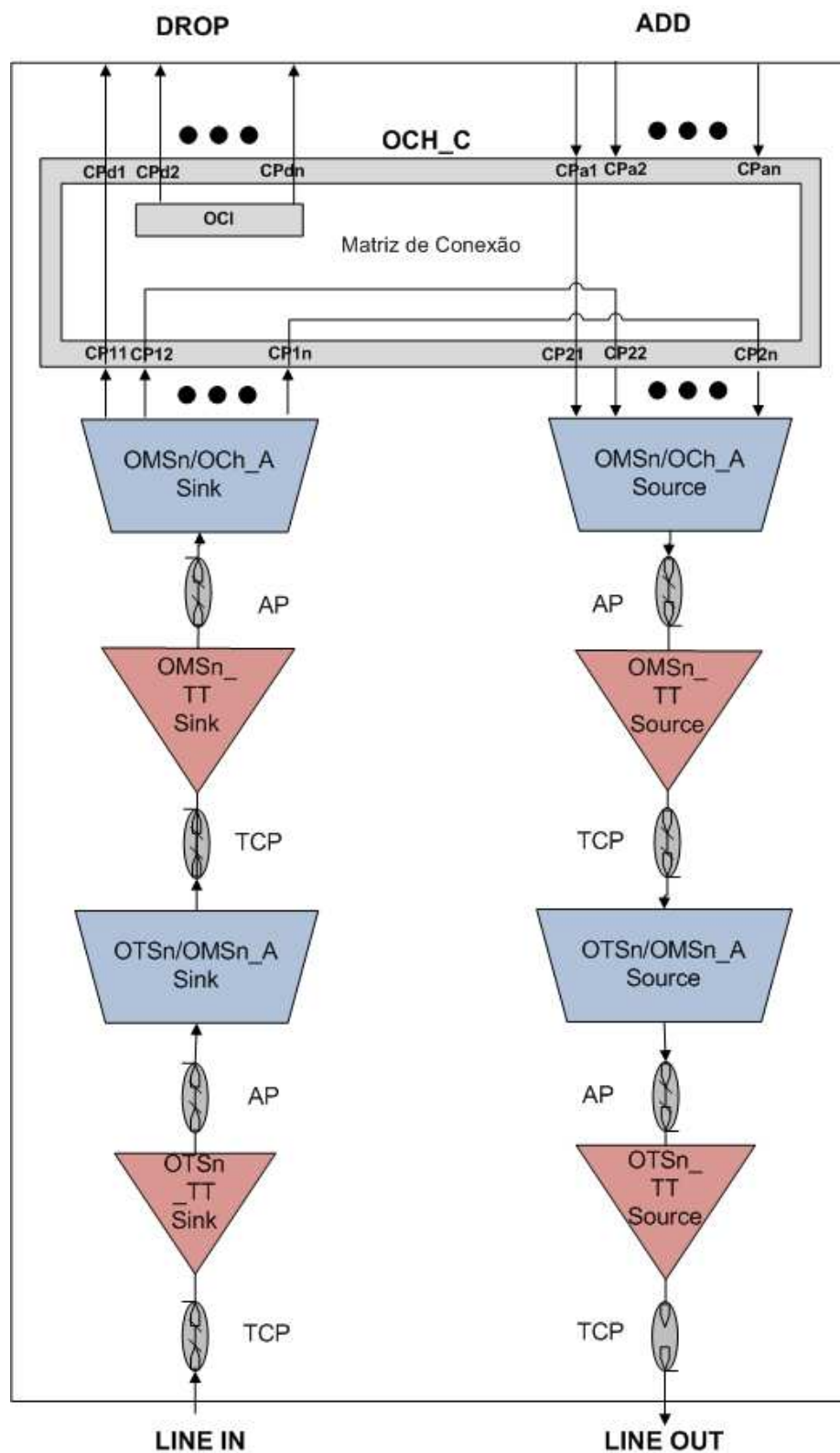


Figura 2-11: modelagem de um ROADM unidirecional de grau 2, com n comprimentos de onda

2.3.5.1 Funcionalidade completa e reduzida

Na arquitetura OTN existe um tipo de funcionalidade reduzida que simplifica as camadas da parte óptica, conforme a Figura 2-12. Em vez de uma estrutura com as camadas OCh, OMS e OTS, existem apenas as camadas OCh e OPS (*Optical Physical Section*). Na funcionalidade reduzida não existe cabeçalho das camadas *Optical Channel with reduced functionality* (OChr) e *Optical Physical Section of order n* (OPSn) e, portanto, não existe canal de serviço nem os mecanismos definidos para monitoramento e isolamento de falhas na camada óptica. Além disso, segundo a recomendação G.798 a OTN com funcionalidade reduzida não possui a função de conexão da camada OCh, OCh_C, e, portanto, não possui capacidade de roteamento de comprimentos de onda. Por esses motivos a arquitetura com funcionalidade reduzida não faz parte do escopo do presente trabalho.

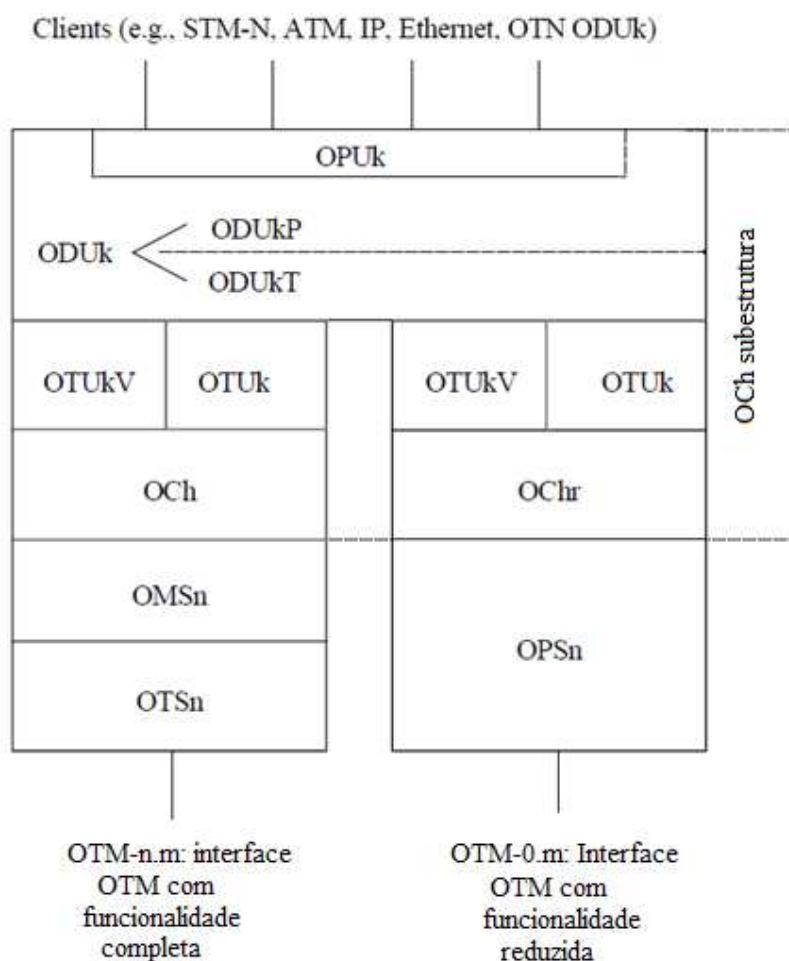


Figura 2-12: Estrutura de camadas da OTN.

Fonte: (ITU-T, G.709, 2003)

2.4 SIMULAÇÃO DE REDES ÓPTICAS

Em computação, simulação consiste em “imitar” um processo ou uma operação do mundo real computacionalmente. A simulação de redes ópticas é um processo muito utilizado para validar protocolos ou sistemas, já que a implementação física de uma rede teste, em geral, é muito custosa.

Segundo (Jeruchim, Balaban, & Shanmugan, 2002), um “sistema de comunicação” (ex.: uma rede de comunicação global; uma comunicação sem fio entre dois dispositivos; uma complexa rede OTN) pode ser dividido em uma hierarquia com dois níveis de abstração. No nível mais alto estão as redes de comunicação, formadas por um conjunto de nós interconectados através enlaces de comunicação. No nível mais baixo estão os componentes que formam os enlaces, como (de)moduladores, circuitos digitais, amplificadores, (de)codificadores e outros componentes que realizam o tratamento do sinal que transporta a informação pelo enlace.

As técnicas de simulação utilizadas dependem do nível de abstração e do objetivo da simulação. Por exemplo, em uma rede OTN o nível de rede é composto pelos ONE's, os enlaces de dados, os componentes internos dos ONE's, como, por exemplo, a matriz de conexão de um OXC, ou o microprocessador que gera o quadro OTUk. Segundo (Jeruchim, Balaban, & Shanmugan, 2002), nesse nível deve-se utilizar um simulador orientado a eventos, onde a simulação pode oferecer informações de desempenho do sistema, como o *throughput* da rede ou a utilização dos enlaces. No nível de enlaces da OTN estão os lasers, os (de)moduladores, o sinal óptico WDM e a própria fibra. Neste nível a simulação tem como objetivo validar o sistema de geração do sinal óptico, bem como o seu comportamento durante o trajeto pela fibra, a fim de estimar algumas características do enlace, como o nível de ruído ou a queda de potência do sinal óptico. Neste caso, devem-se utilizar simuladores baseados em modelos matemáticos para gerar um sinal óptico com o comportamento mais próximo possível do sinal óptico real. As características obtidas sobre o enlace são repassadas para as simulações do nível de rede.

A simulação da OTN no presente trabalho está no nível de rede da divisão proposta por (Jeruchim, Balaban, & Shanmugan, 2002) e é modelada no simulador de eventos discretos OMNET++. O objetivo desta simulação é fornecer um modelo do

plano de transporte que esteja de acordo com as normas da ITU para a validação da proposta de uso do GMPLS em redes OTN.

2.4.1 Trabalhos Relacionados

De um modo geral, os autores simulam a rede OTN sem considerar os padrões da ITU, já que o objetivo principal é a validação de outro componente, como, por exemplo, uma proposta de plano de controle. (Cieutat & Binh, 2003) utilizam o OMNET++ para demonstrar a aplicação métodos de *Routing Wavelength Assignment* (RWA) em uma rede óptica com plano de controle GMPLS. Nessa proposta, cada roteador é formado pelo plano de controle e transporte integrados no mesmo módulo, ou seja, não há uma separação explícita do código do controlador e do ONE.

(Binh, Binh, & Tu, 2009) desenvolveram um módulo no OMNET++ apenas para demonstrar seus algoritmos de RWA. Cada nó da rede pode ou não realizar a comutação e conversão de comprimentos de onda dos sinais WDM que atravessam o nó. Na literatura podem ser encontrados muitos trabalhos que implementam uma rede OTN dessa forma simplista, com uma visão de alto nível muito abstrata. Esses trabalhos são aproveitados para o presente trabalho, pois um dos objetivos desta dissertação é mostrar como se dá a interação entre o plano de controle GMPLS e um equipamento OTN do mundo real, que está de acordo com os padrões da ITU.

Há ainda outros trabalhos de simulação que possuem uma abordagem mais detalhada da rede óptica. Em (White I. M., Rogge, Shrikhande, & Kazovsky, 2003) é proposta uma nova arquitetura de rede óptica WDM, baseada em uma multiplexação TDM dos dados e em uma estrutura em anel de transmissão, além de definir um protocolo de acesso aos sinais WDM que trafegam pela rede. A validação do sistema é feita através de simulação no OMNET++, porém o modelo de simulação da rede óptica é baseado na arquitetura proposta em (White I. M., Rogge, Shrikhande, & Kazovsky, 2003), a qual não tem nenhuma relação com a arquitetura OTN definida pela ITU.

Em linhas gerais, os modelos de simulação encontrados ou são genéricos demais, como em (Cieutat & Binh, 2003) e (Binh, Binh, & Tu, 2009), ou específicos demais para demonstrar uma nova tecnologia, como em (White I. M., Rogge, Shrikhande, & Kazovsky, 2003). Assim, para o presente trabalho é desenvolvido também a simulação de redes OTN (Capítulo 5) para validação do plano de controle GMPLS.

3 PLANO DE CONTROLE GMPLS

Neste capítulo é apresentada uma síntese do *Generalized Multi-Protocol Label Switching* (GMPLS), que é uma solução para o plano de controle baseada em protocolos do mundo IP. Também é apresentada uma síntese do *Multi-Protocol Label Switching* (MPLS) e como o GMPLS surgiu a partir dele. Em seguida aborda-se a arquitetura do GMPLS, suas principais características, bem como os processos e protocolos envolvidos na sinalização, roteamento e gerência de enlaces.

3.1 PADRONIZAÇÕES PARA PLANO DE CONTROLE

Nesta seção são apresentados os três principais órgãos de padronização do plano de controle e qual a relação entre as suas propostas.

A ITU-T define na recomendação G.8080 (ITU-T, G.8080, 2006) a *Architecture for the Automatically Switched Optical Network* (ASON) para o plano de controle de redes ópticas. ASON utiliza os conceitos de nó, subrede e *Subnetwork Point* (SNP) para representar os recursos da rede de transporte. Um nó é um elemento do plano de transporte, indivisível em termos de funcionalidade, como, por exemplo, um nó ROADM. Um SNP representa um CP possível de uso na rede de transporte. Assim, a associação de dois SNPs representa um enlace na rede de transporte. Uma subrede é um conjunto de nós e SNPs que podem ser abstraídos em um único nó, ou uma nuvem.

Segundo (Farrel & Bryskin, 2006), o objetivo principal da arquitetura ASON é fornecer serviços sobre as redes de transporte. O conceito de serviço é representado por uma chamada, que nada mais é que uma conexão fim-a-fim que transfere os dados do cliente. Uma chamada é formada por uma série de conexões que são realizadas na rede de transporte.

A arquitetura ASON define entidades funcionais abstratas para prover os processos necessários ao estabelecimento das chamadas e conexões. Os principais componentes do ASON são os controladores de chamada, controladores de

conexão, controladores de rotas e o gerente de recursos de enlace. O estabelecimento das chamadas é feito pelos controladores de chamada, os quais após o estabelecimento trocam informações a fim de gerenciá-las. Na Figura 3-1, os controladores de conexão apenas estabelecem as conexões após uma indicação do controlador de chamada. Para saber as conexões que devem ser estabelecidas, o controlador de conexões requisita um caminho ao controlador de rotas, ao passar a origem e o destino das conexões. Por fim, o gerenciador de recursos de enlace é usado para alocar os recursos na rede de transporte, ou seja, é a interface entre o controlador de conexões e a rede de transporte. Observe que esses elementos do ASON podem estar integrados ao equipamento da rede de transporte, como no caso do CC1 e seu controlador de chamadas, ou separados, como no caso do CC5.

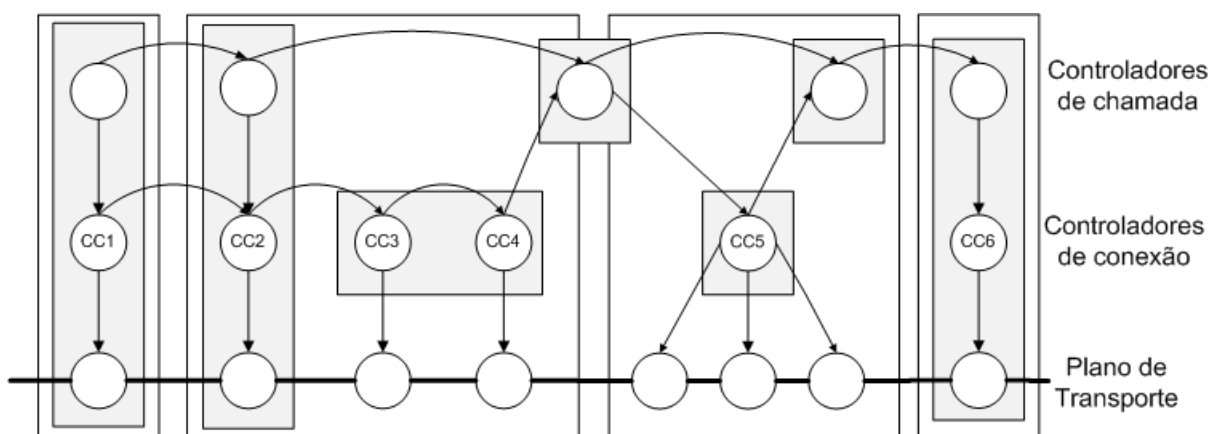


Figura 3-1: Iteração entre os controladores de chamada e de conexão

Fonte: (Farrel & Bryskin, 2006, p. 339)

O ASON também define três tipos de interfaces lógicas, ou pontos de referência, dentro de uma típica rede de transporte onde as informações de sinalização e roteamento são trocadas: A *User Network Interface* (UNI), situada entre o cliente e a rede de transporte; A *Internal Network-Network Interface* (I-NNI), situada entre dois elementos da rede de transporte dentro do mesmo domínio; O *External Network-Network Interface* (E-NNI), que é uma interface entre duas redes de transporte adjacentes, ou seja, entre dois domínios.

O IETF apresenta o *Generalized Multi-protocolo Label Switching* (GMPLS) como solução de plano de controle uniforme para uma rede transporte. O GMPLS baseia-se na extensão dos protocolos do *Multi-protocolo Label Switching* (MPLS) para que possam ser usados para controlar outros sistemas além das redes baseadas na

arquitetura TCP/IP, como redes SDH, SONET, OTN e qualquer outra rede de transporte.

Enquanto o ASON define apenas uma arquitetura genérica e funcional, os protocolos do GMPLS baseados nas tecnologias do mundo IP implementam as funcionalidades necessárias em um plano de controle. Segundo (Farrel & Bryskin, 2006), faz sentido utilizar os protocolos do GMPLS para implementar a arquitetura ASON, o que, por outro lado, leva os fabricantes de equipamentos a gerar diferentes soluções, uma vez que não existe padronização para unir os trabalhos da ITU-T e IETF.

O OIF (*Optical Internetworking Forum*), em relação ao plano de controle, tem como objetivo avaliar as soluções e padronizações dos outros órgãos para promover soluções interoperáveis de plano de controle para redes ópticas através da criação dos *Implementation Agreements* (IAs), que nada mais são do que documentos que procuram relacionar como as funcionalidades do GMPLS podem ser utilizadas para implementar a arquitetura ASON.

O OIF só define IAs para as interfaces UNI e E-NNI. No entanto, o presente trabalho tem como proposta avaliar uma solução intra-domínio, o que excluiu o OIF dos nossos estudos. Além disso, o principal foco nas IAs UNI e E-NNI está na relação ASON/GMPLS, e não no uso do GMPLS para controlar redes OTN.

3.2 MPLS

Embora o sucesso das redes IP's esteja relacionado a sua simplicidade e baixo custo, os problemas de desempenho e a falta de mecanismos eficientes de QoS tornam seu uso impeditivo no núcleo das redes das grandes operadoras. Por outro lado, o custo de tecnologias como o *Asynchronous Transfer Mode* (ATM) levaram os fabricantes de equipamentos de telecomunicações a pesquisar outras formas de se utilizar o IP provendo um serviço de banda larga.

Segundo (Perros, 2005), o MPLS, padronizado pelo IETF, fornece uma estrutura de transmissão orientada a conexão que, embora a idéia inicial fosse aplicá-lo a

diferentes protocolos de rede, foi originalmente desenvolvido exclusivamente para as redes IP's. O MPLS soluciona o principal problema de escalabilidade dos roteadores IP's tradicionais utilizando o conceito de comutação de rótulos. Na Figura 3-2, os roteadores que implementam o MPLS são chamados de *Label Switch Router* (LSR), e quando estão na borda da rede MPLS são também conhecidos por *Label Edge Router* (LER). Quando um pacote IP entra em uma nuvem MPLS ele é classificado e associado um rótulo no LER. Os roteadores do núcleo da rede realizam a comutação desse pacote com base no rótulo, através do mapeamento {rótulo de entrada, interface de entrada} para {rótulo de saída, interface de saída}.

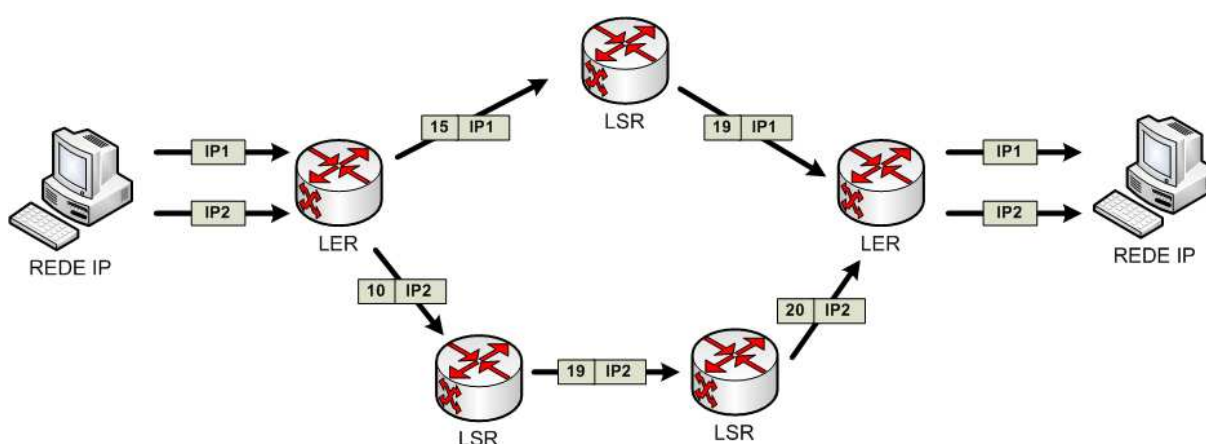


Figura 3-2: Exemplo de rede MPLS

O ganho de desempenho está no fato de que a operação de análise de todo o cabeçalho IP é feita apenas nos roteadores de borda no MPLS. No núcleo da rede é aplicada apenas uma operação de comutação com base no rótulo. Segundo (Perros, 2005), o MPLS contorna, dessa, forma a operação computacionalmente ineficiente de busca na tabela de rotas do IP.

O MPLS *with Traffic Engineering extensions* (MPLS-TE) fornece mecanismos eficientes de controle de QoS através de métodos de engenharia de tráfego. Na Figura 3-2, dois fluxos com diferentes exigências de QoS atravessam diferentes caminhos, apesar de possuírem a mesma origem e destino. O fluxo representado pelo pacote IP1 possui restrições quanto ao atraso e, portanto, passa por um caminho menor que o segundo fluxo. Um caminho dentro de uma rede MPLS é chamado de *Label Switched Path* (LSP), e representa uma conexão fim-a-fim entre o LER de ingresso com o LER de egresso para o transporte de um sinal cliente, ou em

alguns casos entre LSR's do núcleo. No exemplo, são estabelecidos dois LSP's diferentes para transportar os dois fluxos.

Em uma rede IP tradicional, a escolha da rota é feita em cada nó, pois não há o estabelecimento de uma conexão. Sempre é escolhido o menor caminho na visão de cada roteador e o QoS é realizado apenas nas filas dos roteadores. No MPLS é possível balancear a rede como um todo devido a flexibilidade através do uso dos LSP's, evitando congestionamentos nos principais enlaces e dando a prioridade para diferentes tipos de tráfego. Além disso, por ser orientado a conexão, no MPLS só é estabelecido um LSP se for possível satisfazer as restrições de QoS requeridas.

3.3 Do MPLS PARA O GMPLS

O crescimento da utilização das redes de transporte e a necessidade de aprovisionar serviços sob demanda, com um tempo de resposta curto e com restrições de qualidade de serviço (QoS), trazem consigo um grande desafio operacional, tornando necessário o uso de um plano de controle para automatizar muitas das operações sobre a rede.

Uma alternativa é criar um plano de controle para cada rede de transporte. A principal vantagem dessa abordagem é ter um plano de controle otimizado para cada tecnologia. Por outro lado, uma das principais desvantagens está na quantidade de esforço necessária para desenvolver diferentes protocolos e arquiteturas. Além disso, segundo (Farrel & Bryskin, 2006) as redes de transporte têm uma tendência à segmentação. Por exemplo, parte da rede é formada por roteadores IP's e comutadores da camada 2, outra parte por comutadores TDM SONET/SDH e o núcleo utilizando OTN. Existe também a segmentação horizontal, onde a rede é dividida em diferentes domínios entre diversos fabricantes. Nessa abordagem o plano de controle não tem uma visão global da rede, alocando caminhos que são os melhores dentro do seu domínio, mas sem garantias de que o caminho fim-a-fim, que atravessa todos os domínios, seja o mais adequado.

No final da década de 90, o crescente aumento das redes WDM e a busca por um plano de controle levaram os pesquisadores a observar que a operação de

comutação em uma rede WDM era logicamente similar a comutação em um dispositivo utilizando o MPLS. Por exemplo, em um OXC a operação de converter o comprimento de onda de um sinal proveniente de uma determinada porta de entrada em outro comprimento de onda e comutá-lo para uma porta de saída é logicamente igual à comutação de rótulos realizada no MPLS, baseada no mapeamento {rótulo de entrada, porta de entrada} para {rótulo de saída, porta de saída}. Então faz sentido aproveitar as técnicas de sinalização do MPLS para controlar a configuração dessas operações de comutação realizadas na rede de transporte.

A mesma idéia pode ser aplicada a outras redes de transporte. Assim como uma rede óptica realiza a comutação de comprimentos de onda, ou de uma fibra inteira, uma rede TDM, como o SONET/SDH, realiza a comutação de *timeslots*. O GMPLS surge como uma solução unificada para plano de controle através do uso das técnicas e processos do MPLS nas redes de transporte.

3.4 ARQUITETURA GMPLS

O suporte às novas tecnologias de comutação gera mudanças em algumas das funções da arquitetura tradicional do MPLS e até na inclusão de novas funcionalidades. Essas mudanças e inclusões impactam basicamente nas propriedades de um LSP: Como se faz a requisição e comunicação dos rótulos, a natureza unidirecional dos LSP's, como os erros são propagados e as informações providas para a sincronização dos LSR's de ingresso e egresso.

Ao longo desta seção são apresentadas as principais funcionalidades do GMPLS e as modificações com relação à arquitetura tradicional do MPLS.

3.4.1 Novas tecnologias de comutação

Segundo a (RFC3945, 2004), o GMPLS difere-se do MPLS por englobar diferentes tipos de comutação. A arquitetura MPLS descrita em (RFC3031, 2001) exige que o plano de transporte possa reconhecer os limites e acessar os campos dos cabeçalhos das camadas 3 e 2 do modelo OSI. Ou seja, os LSR's de camada 3

devem ser capazes de retransmitir um pacote de acordo com o cabeçalho IP, ou os LSR's da camada 2 retransmitem os quadros ou células (no caso do ATM). Por outro lado, conforme o comparativo da Tabela 1, os LSR's do GMPLS, ou mais especificamente as suas interfaces, podem comutar outras unidades, incluindo *timeslots*, comprimentos de onda ou fibras inteiras. Com isso, o plano de controle GMPLS pode ser aplicado a tecnologias de transporte como o SONET/SDH, com interfaces TDM, ou a hierarquia óptica de transporte da OTN, com interfaces *Lambda Switch Capable* (LSC) ou *Fiber-Switch Capable* (FSC).

Tabela 1: Tipos de tecnologias de comutação suportadas pelo MPLS e o GMPLS

Tipo de interfaces	MPLS	GMPLS
<i>Packet Switch Capable (PSC) interfaces</i>	SIM	SIM
<i>Layer-2 Switch Capable (L2SC) interfaces</i>	SIM	SIM
<i>Time-Division Multiplex Capable (TDM) interfaces</i>	NÃO	SIM
<i>Lambda Switch Capable (LSC) interfaces</i>	NÃO	SIM
<i>Fiber-Switch Capable (FSC) interfaces</i>	NÃO	SIM

3.4.2 Divisão do plano de controle

O plano de controle GMPLS pode ser dividido em 2 sub-planos: 1) o plano de roteamento, responsável por manter e distribuir informações sobre recursos da rede, a fim de fornecer possíveis caminhos a serem utilizados pelos LSP's, e 2) o plano de sinalização, cuja principal função é estabelecer os LSP's no plano de transporte.

O plano de sinalização é formado pelos processos e instâncias dos protocolos *Resource Reservation Protocolo – Traffic Engineering* (RSVP-TE) e/ou *Constraint-Routing Label Distribution Protocol* (CR-LDP), o plano de roteamento pelo *Open Shortest Path First – Traffic Engineering* (OSPF-TE) e/ou *Intermediate System to Intermediate System – Traffic Engineering* (IS-IS-TE).

3.4.3 Separação dos planos de controle e transporte

Uma das principais diferenças entre o GMPLS e o MPLS é a separação do plano de controle do plano de transporte. No MPLS, as mensagens dos protocolos de sinalização e roteamento são enviadas pelo mesmo canal físico que os dados do cliente e alguns processos, como os do *Label Distribution Protocol* (LDP), possuem seu modo de operação baseado nessa premissa. Assim, o canal de controle e o canal de dados (por onde passa a carga útil, a informação do cliente) são coincidentes, ou seja, estão conectados aos mesmos pares de nós da rede e possuem as mesmas propriedades em termos de taxa de erro, largura de banda e atraso.

Nas redes de transporte essa obrigatoriedade pode ser impossível de se aplicar. Por exemplo, em uma rede OTN transparente, ou seja, puramente óptica, não há como recuperar as informações de controle nos nós uma vez que não existe conversão O-E-O. Nessas situações, os dados de controle precisam ser transportados por um canal separado, ou mesmo por outra rede. Além disso, o componente de software que forma o plano de controle pode ser fisicamente separado dos elementos da rede de transporte. Na Figura 3-3, os controladores C1, C2 e C3, responsáveis pelos elementos do plano de transporte, implementam os protocolos do plano de controle e trocam mensagens pelo canal de controle. No GMPLS, os LSR's são os comutadores/roteadores ópticos ou digitais, como um ROADM ou um roteador com interfaces SDH. O controlador pode ser integrado no LSR, embora isso não seja um requisito.

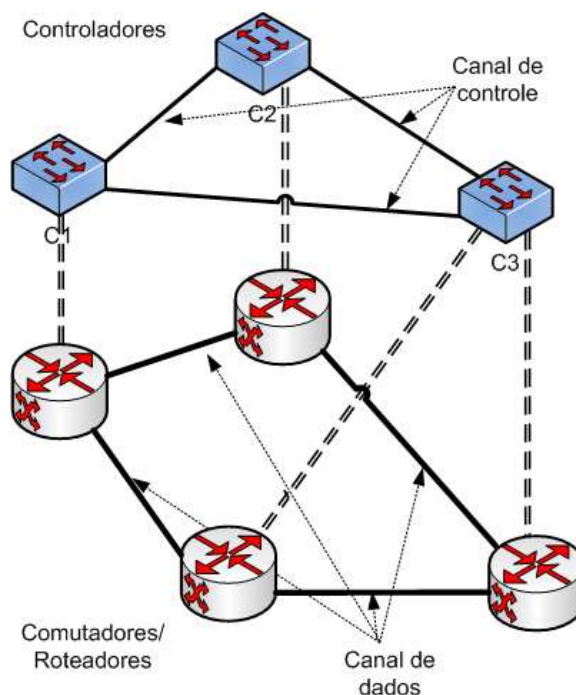


Figura 3-3: switches, controladores e canal óptico

Quanto ao formato do canal de controle, a (RFC3945, 2004) não especifica como deve ser implementado, mas tem como requerimento o uso do IP para transportar as mensagens de sinalização e roteamento.

A separação dos planos de controle e transporte acrescenta uma série de complicações e desafios para o GMPLS. Por exemplo, nos processos que envolvem a verificação de enlaces, apenas um processo de verificação é realizado, uma vez que o canal de controle também é o canal de dados. Em situações como o canal de serviço separado é necessário utilizar um processo adicional de verificação de enlaces do canal de controle. Assim, todos os protocolos e processos do GMPLS são construídos considerando a completa separação entre os planos de controle e transporte.

3.4.4 Endereçamento no GMPLS

Como o GMPLS engloba redes que não-IP, é importante que o plano de controle possa operar com equipamentos e interfaces de rede que não utilizam o endereçamento IP. Um enlace (ou interface) é dito *numerado* quando utiliza um endereço IP para ser identificado, ou *não-numerado* quando utiliza um

endereçamento que não seja o IP. O MPLS-TE não possui suporte a endereçamento não-numerado.

Cada LSR precisa de informações sobre as terminações dos seus enlaces para propósitos de engenharia de tráfego. Quando os enlaces são não-numerados, um mecanismo adicional deve ser utilizado para que os identificadores locais desses enlaces sejam trocados entre os LSR's aos quais eles pertencem. Segundo a(RFC3945, 2004), os identificadores locais podem ser trocados via configuração pelo *Link Management Protocolo* (LMP), através do RSVP-TE/CR-LDP ou por extensões do OSPF/IS-IS.

3.4.5 Os rótulos no GMPLS

Os rótulos no MPLS estão associados a recursos lógicos e não físicos. Por exemplo, supondo que se deseja alocar uma LSP para transportar um tráfego de 1 Mbps por uma rede com enlaces de 10 Mbps. O rótulo indica a quantidade de recursos estatisticamente reservados, 1 Mbps no exemplo, mas não identifica o recurso físico utilizado. A reserva representa uma porcentagem dos recursos disponíveis, mas os recursos (por exemplo, os *buffers*) que estão alocados para suportar aquele fluxo, tanto que a quantidade total de reserva realizada pode ser maior do que a capacidade total do enlace, considerando que nem todos os fluxos usem a largura máxima de banda permitida a eles ao mesmo tempo.

No GMPLS, quando aplicado as redes TDM, LSC ou FSC, os rótulos representam um recurso físico, como um *timeslot* ou um comprimento de onda. Isso faz com que os rótulos precisem ser disjuntos, ou seja, o mesmo rótulo não pode ser utilizado para representar diferentes recursos físicos. Por exemplo, em uma rede WDM um rótulo representa apenas um único comprimento de onda.

Com o rótulo representando diretamente um recurso físico, o GMPLS apresenta um menor nível de granularidade para os serviços fornecidos. Por exemplo, ao alocar um rótulo que representa um comprimento de onda em uma rede OTN, não é possível oferecer um serviço fora das taxas que aquela interface suporta (2.5, 10 ou 40 Gbps pelo padrão atual). Portanto, se alocar um comprimento de onda para

transportar um sinal cliente de 5 Gbps, 50% da banda será desperdiçada, já que não é possível, no nível óptico, compartilhar com outros sinais clientes. No MPLS, por ser um recurso estatístico, não existe limitação para o grau de granularidade. Em um enlace de 10 Gbps pode ser alocado diretamente sobre ele LSP's de taxas menores. No entanto é possível utilizar uma multiplexação TDM antes para agrupar sinais de taxas menores antes de enviar pelo canal óptico.

3.4.6 Conexões bidirecionais

Segundo (Farrel & Bryskin, 2006), os serviços de transporte oferecidos pelos provedores, em sua maioria, são bidirecionais, permitindo a transferência de dados em ambas as direções. Por outro lado, os LSP's do MPLS são apenas unidirecionais, onde o estabelecimento de circuitos bidirecionais é realizado através da criação de dois LSP's unidirecionais, um em cada direção. Para diminuir a quantidade de sinalização trocada, o GMPLS permite o estabelecimento de LSP's bidirecionais com um único processo de sinalização (seção 3.4.6), ou seja, em vez de alocar dois LSP's unidirecionais, basta alocar um único LSP bidirecional.

3.4.7 Hierarquia no GMPLS

Uma rede pode ser particionada verticalmente de acordo com as tecnologias de comutação apresentadas na seção 3.4.1. O conjunto de enlaces conectados a interfaces do mesmo tipo de comutação (PSC, L2SC, TDM, LSC ou FSC) formam uma região de engenharia de tráfego, ou simplesmente região. Uma camada de comutação, ou simplesmente camada, é o grupo de enlaces de dados e interfaces que possuem o mesmo tipo de comutação, codificação e granularidade. Como exemplo de camadas, tem-se o SDH VC12, SDH VC4, OTM-16.1.

Um circuito, ou seja, um LSP, só é estabelecido entre elementos da mesma região. A rede de uma região de baixa ordem (cliente), geralmente não tem visão da região alta ordem (servidor). Por exemplo, para uma rede IP os dispositivos do SDH que transportam seus dados são completamente transparentes, fornecendo uma

conectividade ponto-a-ponto na visão do IP. Isso gera uma hierarquia, onde os dados das regiões de baixa ordem são “encapsulados” pela região de alta ordem.

No MPLS, os LSP's são aninhados através do empilhamento de rótulos. Porém, nas redes de transporte não existe empilhamento, pois não há um rótulo sendo transportado no plano de transporte acoplado aos dados do usuário, como acontece no MPLS. De acordo com a Figura 3-4, os LSP's no GMPLS são aninhados da região de mais baixa ordem, PSC, até a de mais alta ordem, FSC, criando uma hierarquia natural entre as camadas.

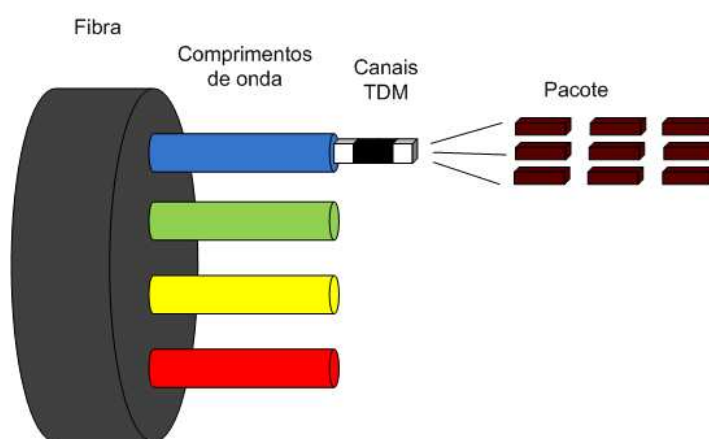


Figura 3-4: Hierarquia GMPLS dos tipos de comutação.

Fonte: (Farrel & Bryskin, 2006)

Detalhes sobre o estabelecimento de LSP's em redes multi-camadas é apresentado na seção 3.5.5.

3.4.8 Modelo de serviço

Segundo (Farrel & Bryskin, 2006), o GMPLS permite o estabelecimento dos LSPs através de três tipos modelos de serviço: modelo de cooperação, modelo de sobreposição e o modelo híbrido. Esses modelos impactam fundamentalmente na forma com que um LSP é estabelecido por uma rede heterogênea, com diferentes camadas de comutação.

No modelo de cooperação, ou modelo de serviço unificado, existe a primitiva de visão completa de toda a hierarquia da rede pelo protocolo de roteamento. Além disso, esse modelo utiliza um único protocolo de sinalização comum de forma que

não existem fronteiras ou domínios separados para o estabelecimento do circuito. A Figura 3-5a representa um provisionamento fim-a-fim utilizando o modelo de serviço unificado. A principal vantagem desse modelo é o estabelecimento de LSP's otimizados, permitindo que se escolha por completo o caminho que se deseja transmitir, o que, por outro lado, implica em uso de algoritmos complexos para o cálculo dessas rotas visando o melhor desempenho de toda a rede. Além disso, existe um problema de granularidade, por exemplo, na alocação de um serviço fim-a-fim de 10 Mbps os comprimentos de onda do núcleo operam a 10 Gbps, que não podem ser subdivididos. Como foi explicado, isso é resolvido utilizando-se os LSP's hierárquicos (seção 3.5.5).

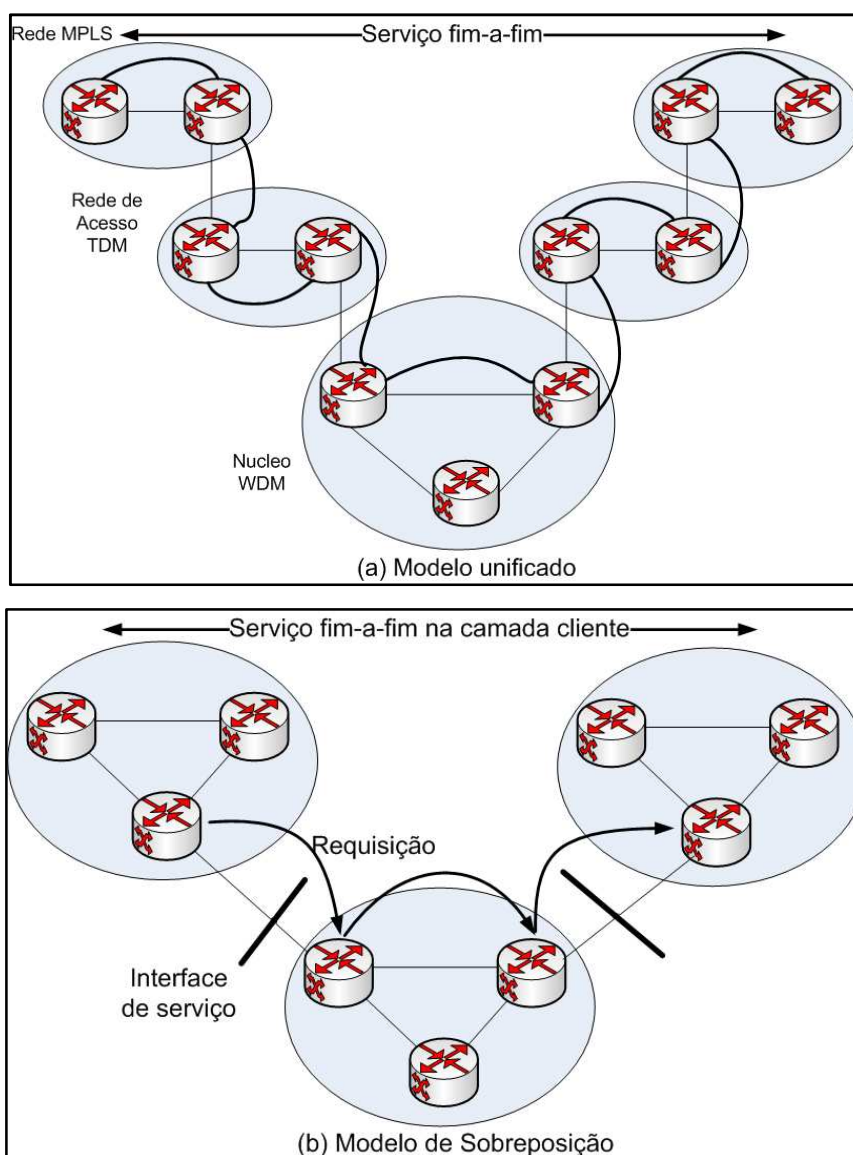


Figura 3-5: Modelos de serviços (a) Modelo de cooperação e (b) modelo de Sobreposição

Fonte: (Farrel & Bryskin, 2006)

Na Figura 3-5b, o modelo de sobreposição, algumas vezes chamado de modelo de serviço de domínio, possui uma interface de serviço entre as camadas da rede pela qual um nó de camada superior solicita um serviço de transmissão à camada inferior. O termo camada não precisa estar necessariamente ligado às diferentes tecnologias de comutação: uma mesma camada TDM, por exemplo, pode ser dividida em diferentes domínios de serviço. Cada camada opera independentemente, em um modelo cliente-servidor, permitindo o uso de diferentes mecanismos de sinalização e roteamento dentro de cada domínio. Assim, a camada superior sabe apenas que seus dados estão sendo transportados com um determinado nível de QoS, mas não tem nenhuma idéia da infra-estrutura que está sendo utilizada pela camada inferior. Isso é útil entre diferentes operadoras, onde não há interesse em compartilhar esse tipo de informação.

No modelo híbrido, embora exista a separação da rede como no modelo de sobreposição, um nível de informações maior é trocado entre as entidades, de forma que a camada superior tenha uma visão parcial, ou mesmo abstrata da camada inferior. As informações que são trocadas entre as camadas são limitadas por políticas de segurança, a fim de conseguir um meio termo entre os modelos de cooperação e de sobreposição.

3.5 SINALIZAÇÃO

Sinalização

[...] é o processo de troca de mensagens pelo plano de controle para estabelecer, manter e terminar caminhos de dados no plano de transporte. No contexto do GMPLS, esses caminhos de dados são os LSP's. O conjunto formado pelas mensagens de sinalização e as regras de processamento das mesmas é conhecido como protocolo de sinalização. (Farrel & Bryskin, 2006, p. 40)

Os protocolos existentes do MPLS são estendidos a fim de atender aos novos requerimentos do GMPLS, como o estabelecimento de LSP's bidirecionais e o estabelecimento de LSP's hierárquicos.

O plano de sinalização do GMPLS baseia-se na extensão do *RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels* (RFC3209, 2001) ou do *Constraint-Based LSP Setup using LDP* (CR-LDP(RFC3212, 2002). No entanto, no documento (RFC3468, 2003), o grupo de trabalho do MPLS no IETF declarou que os seus esforços estão concentrados no plano de sinalização baseado no RSVP-TE, e que nenhuma atividade a partir daí será desenvolvida com relação ao CR-LDP para o GMPLS. Por esses motivos o presente trabalho aborda apenas os mecanismos relacionados com o RSVP-TE.

No RSVP-TE um serviço de transporte é fornecido através das sessões e dos túneis. Uma seção representa os fluxos de dados que trafegam para um destino particular. Dentro de uma seção, diversos fluxos de dados compartilham os mesmos recursos. O RSVP-TE define o conceito de túnel, ou *Label Switch Path* (LSP), que tem como tarefa transportar os dados entre sua entrada e a saída. Assim, o LSP representa o serviço de transporte para um sinal cliente. Através do identificador de túnel e do endereço de origem, um LSP pode ser identificado unicamente dentro de uma seção.

Outra característica importante é que o RSVP-TE, inclusive suas extensões para o GMPLS, opera apenas no modelo de distribuição de rótulos *downstream-on-demand*, onde os rótulos são distribuídos apenas quando há a requisição de um LSR vizinho para transmitir os dados.

Ao longo desta seção são apresentados os mecanismos utilizados pelo RSVP-TE para o estabelecimento dos LSP's, bem como as mudanças sugeridas para o seu uso no GMPLS.

3.5.1 Mensagens no RSVP-TE

As mensagens no RSVP são formadas por um cabeçalho comum seguido de um número variável de objetos. O cabeçalho comum identifica a qual dos tipos apresentados na Tabela 2 a mensagem pertence.

Tabela 2: Mensagens do protocolo RSVP-TE

Mensagem	Função
Path	Requer o estabelecimento de um LSP
Resv	Utilizada para confirmar a alocação dos recursos requeridos
PathErr	Mensagem de erro quando uma mensagem de <i>Path</i> gera problemas. Por exemplo, a mensagem pode estar com algum campo incorreto, ou então não foi possível alocar os recursos requisitados.
ResvErr	Mensagem de erro quando uma mensagem de <i>Resv</i> gera problema. Por exemplo, em casos que o rótulo enviado pela mensagem de <i>Resv</i> não pode ser utilizado.
PathTear	Utilizada pelo LER de ingresso para desfazer um LSP
ResvTear	Utilizada pelo LER de egresso para desfazer um LSP
Notify	Mensagem de erro que pode ser enviada para um LSR escolhido, mesmo que não seja vizinho ao nó que detectou o erro

Os objetos possuem tamanhos e parâmetros variados, e podem conter um ou mais sub-objetos. Os processos disparados por um nó ao receber uma mensagem RSVP dependem diretamente dos objetos, sua inclusão ou exclusão, e dos valores de seus parâmetros.

As mensagens do RSVP-TE são transportadas pelo IP e trocadas entre os controladores de sinalização. A Figura 3-6 apresenta o formato genérico de uma mensagem do RSVP transportada pelo IP. Portanto, o RSVP-TE pode ser considerado como uma aplicação que envia os dados diretamente pelo IP, sem utilizar um protocolo de transporte da pilha de protocolos da Internet, como o *Transmission Control Protocol* (TCP). No entanto, o RSVP-TE possui um mecanismo próprio de entrega segura de mensagens, com procedimentos de confirmação e retransmissão.

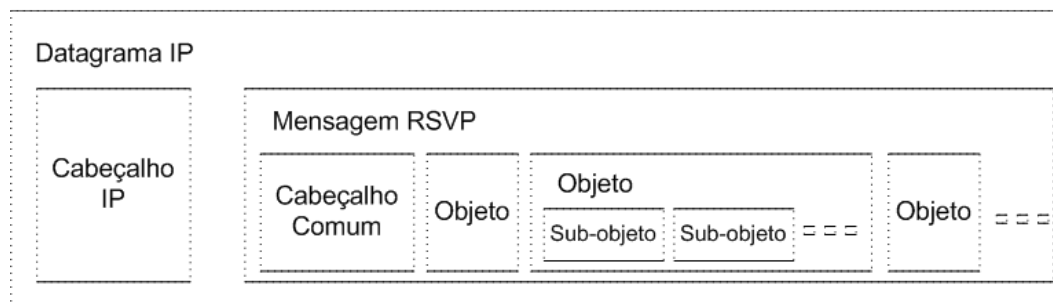


Figura 3-6: Formato Genérico de uma mensagem no RSVP

Fonte: (Farrel & Bryskin, 2006)

3.5.2 Estabelecimento, manutenção e término de um LSP

Na Figura 3-7, um LSP é estabelecido através de uma requisição feita pelo cliente ao LSR adjacente. O LER de ingresso classifica o sinal cliente em uma *Forwarding Equivalence Class* (FEC). Segundo (RFC2205, 1997), se um conjunto de sinais clientes possui a mesma origem e são classificados na mesma FEC, então eles seguem o mesmo caminho. Isso se deve ao fato de que a cada FEC é associado um rótulo.

Após classificar o sinal, o LER de ingresso cria uma mensagem de *Path* para indicar o desejo de alocar um LSP aos LSR's de *downstream*¹ que pertencerão ao caminho alocado. A mensagem de *Path* contém um identificador da seção a qual o LSP pertence (*session object*), um identificador do LSP, denominado (*Sender-Template object*), os parâmetros de QoS desejados, denominado (*Sender-Tspec object*). O objeto *Label_Request* indica que o LSR de *downstream* deve retornar um rótulo para que o LSR de *upstream*² possa enviar os dados. Se o RSVP-TE está operando em uma rede PSC ou L2SC, então esse rótulo é enviado junto com os pacotes ou quadros. Em uma rede TDM, LSC ou FSC, esse rótulo indicará qual é o recurso da rede de transporte que deverá ser usado para transmitir os LSR's adjacentes.

¹ No sentido LER de ingresso para o LER de egresso.

² O contrário de *downstream*; no sentido LER de egresso para o LER de ingresso.

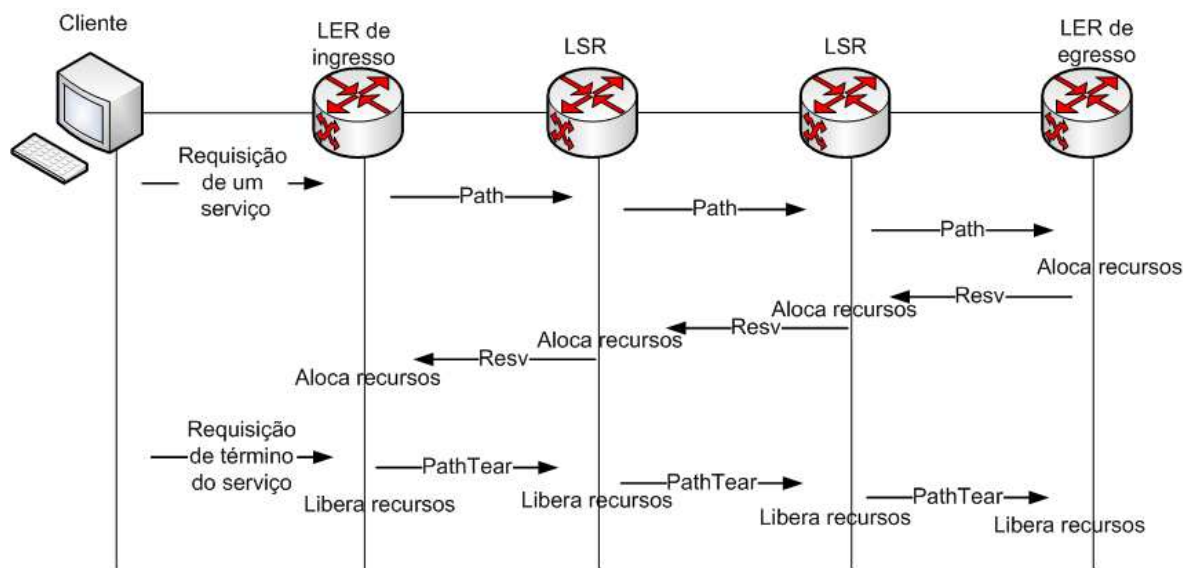


Figura 3-7: Estabelecimento e término de um LSP

Ao receber uma mensagem de *Path*, cada LSR avalia se é possível atender aos requerimentos solicitados. Em caso afirmativo, o LSR transmite a mensagem de *Path* para o seu LSR de *downstream*, após realizar algumas operações e mudanças em alguns objetos. Quando esses requerimentos não podem ser atendidos, uma mensagem de *PathErr* é enviada para o LSR de *upstream* indicando falha na requisição do LSP.

Esse procedimento é feito até o LER de egresso da rede o qual aloca os recursos necessários e envia uma mensagem de *Resv* no sentido *upstream*, com o rótulo (*Label object*) no corpo da mensagem. Os LSR's no sentido *upstream* realizam a mesma operação até que a mensagem de *Resv* chegue ao LER de ingresso. A partir daí todos os recursos necessários para aquele LSP estão alocados e a rede cliente pode transmitir seus dados. Quando o LER de ingresso desejar por algum motivo encerrar a conexão, uma mensagem de *PathTear* é enviada por todo o caminho do LSP até o LER de egresso, liberando os recursos alocados para aquele LSP.

No RSVP, a manutenção de um LSP é feita através do envio contínuo da mensagem de *Path*, durante um intervalo de trinta segundos. Caso os LSR's do caminho deixem de receber essa mensagem é porque houve uma falha em algum ponto do caminho, ou simplesmente porque aquele LSP não é mais necessário. Em ambos os casos os recursos alocados para aquele LSP serão liberados. Em caso de falha, as mensagens de *Path* tomarão outro caminho e novas reservas em outros LSR's serão geradas. Assim, o MPLS é um protocolo *soft-state*.

O problema é que, além do tempo limitado de resposta para a restauração da LSP, uma quantidade enorme de mensagens é trocada para manter os LSP's, já que é necessário enviar uma mensagem de Path para cada LSP. A (RFC2961, 2001) define alguns procedimentos para diminuir a quantidade de *overhead* gerado.

A sinalização do RSVP-TE no GMPLS herda os processos de manutenção do LSP baseados no reenvio das mensagens de PATH e RESV. No entanto, a separação do canal de controle do canal de dados torna esse mecanismo demasiadamente incompleto, pois uma falha no canal de controle não implica diretamente na falha do canal de dados. Assim, o GMPLS utiliza mecanismos diferentes para gerência dos canais de dados e controle, através do LMP (em detalhes na seção 3.7).

3.5.3 Rotas de um LSP

O caminho que o LSP vai atravessar pode ser calculado salto-por-salto, como no IP, onde cada LSR decide qual será o próximo LSR, assim como pode ser, total ou parcialmente, calculado no LER de ingresso. O *Explicit Route Object* (ERO), quando inserido na mensagem de *Path*, indica quais são os nós pelos quais o LSP deve atravessar.

O ERO é formado por uma lista de sub-objetos, cada um representando um nó da rede. Segundo (RFC3209, 2001), os sub-objetos podem ser um endereço IP (IPv4 ou IPv6) ou um *Autonomous System* (AS). Para o LSR que recebe a mensagem de *Path* com o ERO, o primeiro sub-objeto deve corresponder ao endereço do LSR, ou ao endereço do AS que ele pertence. O segundo sub-objeto indica qual é o próximo salto. Assim, antes de prosseguir com a mensagem de *Path* o primeiro sub-objeto deve ser retirado do ERO.

Os sub-objetos podem ser do tipo *strict* ou *loose*. Um nó do tipo *strict* indica que o próximo salto deve ser necessariamente o LSR indicado por ele. Dessa forma, se o segundo sub-objeto do ERO for *strict*, então ele deve necessariamente representar um nó vizinho. Quando o sub-objeto é do tipo *loose*, significa que o nó o qual ele representa deve fazer parte do caminho, mas que ele não precisa necessariamente ser o próximo salto.

O ERO é o mecanismo do RSVP-TE para realizar engenharia de tráfego através do roteamento explícito e pode ser utilizado de diversas maneiras. O operador pode, por exemplo, indicar manualmente qual deve ser a rota exata que um LSP deve seguir na rede, utilizando apenas sub-objetos do tipo *strict*. Em outra situação, o operador pode ter como restrição apenas que o LSP passe por um nó específico, como, por exemplo, um ponto de monitoração da rede. Assim, basta que ele insira um ERO com um sub-objeto do tipo *loose* referenciando aquele elemento. O ERO não fornece flexibilidade apenas para o operador humano, mas também por elementos do plano de controle, como por exemplo, um controlador de roteamento centralizado que calcula todas as rotas para todos os LSR's.

Quando uma rota é apenas parcialmente especificada, pode ser útil que se saiba qual é a rota completa que está sendo momentaneamente utilizada. Para isto basta inserir o *Recorded Route Object* (RRO) em algum ponto do caminho, não necessariamente no LER de ingresso, embora faça mais sentido. Por cada LSR que a mensagem de Path atravessa é inserido um sub-objeto com o endereço IP daquele LSR. Quando o RRO chegar ao LER de egresso, todo o caminho estará salvo nesse objeto e ele deve ser retornado pela mensagem de *Resv*.

3.5.4 Sinalização Generalizada

Todos os procedimentos citados até agora sobre a sinalização são comuns tanto ao MPLS-TE quanto ao GMPLS. Segundo (RFC3945, 2004) os seguintes mecanismos relacionados à sinalização do MPLS-TE são aplicados diretamente ao GMPLS:

- Alocação e distribuição de rótulos *downstream-on-demand*: os rótulos são distribuídos apenas quando há a requisição de um LSR vizinho para transmitir os dados;
- Controle ordenado de rótulos pelo ingresso, onde os rótulos são associados a uma FEC apenas no LER de ingresso;
- Modo de retenção de rótulos liberal ou conservativo (IETF, RFC3031, 2001).
- Roteamento explícito ou salto-por-salto.

No entanto, algumas modificações foram realizadas para adequar o RSVP-TE para ser utilizado como plano de sinalização das redes de transporte.

Novo formato para o objeto *Label_Request*

Além de indicar ao LSR de *downstream* que ele deve retornar um rótulo, o objeto *Label_Request* indica qual é o tipo de rótulo desejado. No RSVP-TE existem três tipos diferentes de rótulos que podem ser requeridos. 1) Um rótulo genérico, que é inserido entre os cabeçalhos das camadas 2 e 3, 2) um rótulo ATM ou 3) um rótulo Frame Relay.

O *Generalized Label_Request* é o novo objeto que deve ser utilizado no lugar do *Label_Request* e estende os tipos de LSP's que podem ser requeridos, cobrindo as redes de transporte, como o SONET/SDH ou as redes WDM. Apenas um objeto *Label_Request*, ou o generalizado, pode ser enviado por mensagem de *Path* e, portanto, apenas um LSP pode ser sinalizado por vez.

O novo objeto contém três parâmetros para especificar o LSP requisitado: o *LSP encoding Type*, o *Generalized Protocol Identifier* (G-PID) e o *Switching Type*. Detalhes dos valores assumidos por esses parâmetros são encontrados em (RFC3471, 2003)

O *LSP encoding Type* indica o tipo de LSP que irá transportar os dados, por exemplo, se será por pacotes (IP), Ethernet, SDH ou Lambda (óptico). Este parâmetro representa a natureza do LSP.

O G-PID identifica qual é o tipo de carga útil transportada pelo LSP. Geralmente, o G-PID é usado apenas nos LER's de entrada e saída, permitindo que o LER de egresso possa terminar o LSP corretamente, entregando a carga útil para o seu destino.

O parâmetro *Switching Type* indica o tipo de operação de comutação que deve ser aplicada em um enlace particular. Embora essa informação geralmente possa ser deduzida do enlace que transporta o LSP uma vez que muitas interfaces suportam apenas um tipo de comutação, é importante garantir o suporte para LSR's mais

sofisticados que possam realizar diferentes operações de comutação em suas interfaces. O *Switching Type* indica uma operação de comutação PSC, L2SC, TDM, LSC ou FSC.

Rótulo generalizado

Ao receber uma mensagem de *Path*, o LSR de *downstream* deve alocar o rótulo de acordo com os recursos disponíveis e o parâmetro *Switching Type* indicado no objeto *Generalized Label_Request*. O LSR de *upstream* é então informado pela mensagem de *Resv* qual foi o recurso alocado para o LSP através do rótulo generalizado (*Generalized_Label object*).

O rótulo generalizado estende as funcionalidades do rótulo tradicional do MPLS, representando não apenas os rótulos que são associados diretamente aos e transportados *in-band* nos tipos de comutação PSC e L2SC, mas também os rótulos (virtuais) que identificam *timeslots*, comprimentos de onda ou um subconjunto dentro de um agrupamento.

Por exemplo, o rótulo pode identificar uma fibra dentro de agrupamento de fibras (um *Trunk*) entre dois LSR's ópticos, ou então um dos comprimentos de onda de um sinal WDM. Também pode representar um rótulo tradicional do MPLS, como um rótulo genérico ou rótulo ATM.

Cada rótulo representa um único elemento, e não uma hierarquia. Quando múltiplos níveis de LSP's são estabelecidos (LSP's dentro de LSP's), cada LSP deve ser estabelecido separadamente.

Segundo (RFC3471, 2003) o objeto *Generalized_Label* pode ter tamanho variável, permitindo assim que qualquer formato possa ser definido, caso novas tecnologias sejam incluídas. A (RFC3471, 2003) especifica apenas que os rótulos que representam comprimentos de onda devem ser um número de 32 bits, enquanto que os rótulos que representam uma faixa de comprimentos de onda devem ser formados por três números de 32 bits: *Waveband ID*, *Start Label*, *End Label*.

Novos Parâmetros de Tráfego

O RSVP-TE, através do objeto *Sender_Tspec*, especifica os parâmetros de tráfego para um LSP PSC. Este objeto é estendido no GMPLS para especificar em detalhes o requerimento de QoS específico de tecnologias de transporte que não são baseadas em pacotes, como o SONET/SDH ou as redes OTN.

Controle de alocação de rótulos aprimorado

Durante o estabelecimento de um LSP, existem situações em que pode ser útil para o LSR de *upstream* restringir os rótulos que são alocados para um determinado LSP. Por exemplo, quando o LSR tiver uma quantidade limitada de lasers, é interessante indicar para o LSR de *downstream* quais são os comprimentos de onda que podem ser alocados, aumentando assim a probabilidade de estabelecimento. Isso é feito através do *Label_Set object*, o qual é inserido na mensagem de *Path*. Este objeto é formado por todos os rótulos (recursos) que o LSR de *upstream* pode utilizar para transmitir os dados. Assim, o LSR de *downstream* deve escolher um desses rótulos ou então gerar uma falha no estabelecimento do LSP.

Em vez de restringir os rótulos que podem ser utilizados, no GMPLS é possível enviar uma sugestão de rótulo através do *Suggest_Label object*, transportado na mensagem de *Path*. Isto é útil quando os equipamentos precisam de certo tempo para programar suas conexões no plano de transporte. Por exemplo, um ROADM só configura sua matriz de conexão quando receber uma mensagem de RESV, pois tem certeza que todos os recursos no sentido *downstream* já foram alocados. No entanto, ele só enviará a mensagem de RESV quando a configuração tiver acabado. Supondo que um LSP atravesse n LSR's, o tempo de estabelecimento através das trocas das mensagens de PATH e RESV é dado pela equação

$$2 \times (n - 1) \times T_m + n \times T_x \quad (1)$$

Onde T_m é o tempo de propagação entre dois LSR's, e T_x é o tempo de configuração do LSR. Uma maneira de diminuir esse tempo de configuração é fazer com que o ROADM já pré-configure a conexão com o rótulo indicado no *Suggest_Label object*,

no momento em que recebe a mensagem de PATH. Quando receber a mensagem de RESV, a configuração já estará realizada e, portanto, não terá que esperar o tempo de configuração T_x . Neste caso, o tempo de configuração é dado pela equação

$$2 \times (n - 1) \times T_m + T_x \quad (2)$$

O que pode ser significativamente menor, dependendo do valor de n e T_x .

O LSR de *downstream*, ao receber a mensagem de Path com o *Suggested_Label object*, está livre para escolher outro rótulo que não o indicado, com a única consequência que o tempo total de estabelecimento estará de acordo com a equação 1.

Os objetos *Label_Set* e o *Suggested_Label* só têm significado entre dois nós, eles não indicam o conjunto de rótulos que deve ser utilizado por todo o caminho. O LER de ingresso pode especificar quais serão os rótulos usados entre dois LSR's através do controle explícito de rótulos. Esse controle é feito através da inclusão de rótulos no ERO. Ao criar uma rota, o LER de ingresso envia uma mensagem de Path onde o ERO é formado pela seguinte seqüência de sub-objetos:

- 1º - O identificador de um LSR (endereço IP ou não-numerado)
- 2º - Um rótulo de *downstream* (*Label ERO subobject*)
- 3º - Um rótulo de *upstream* (*Label ERO subobject*)

Os rótulos no ERO são opcionais e podem estar ambos, um ou nenhum deles presente. Quando inseridos no LER de ingresso, cada LSR de *downstream* retira o primeiro sub-objeto que deve ser igual ao seu endereço IP (ou um identificador não-numerado), depois substitui o valor do *Label_Set object* da mensagem de *Path* pelo rótulo do *Label_ERO sub-object* de *downstream* que segue imediatamente o primeiro endereço IP. Por último, substitui o valor do *Upstream_Label object* pelo rótulo do *Label_ERO sub-object* de *upstream*. Assim, a mensagem de *Path* passa a ser enviada para o LSR de *downstream* (o segundo endereço IP do ERO) que indica diretamente quais devem ser os rótulos alocados.

Conexões Bidirecionais

Um LSP no MPLS-TE é uma entidade unidirecional. Assim, para estabelecer uma conexão bidirecional é necessário utilizar dois LSP's, permitindo que sejam criadas conexões bidirecionais assimétricas, diferentes na largura de banda ou no caminho.

Segundo (RFC3945, 2004), essa abordagem possui algumas desvantagens. Se o tempo de viagem de uma mensagem entre a origem e o destino é de x , então a latência para o estabelecimento dos dois LSP's é de $3x$ (supondo que o segundo LSP é iniciado assim que a mensagem de *Path* do primeiro LSP chegar ao LER de egresso). Em situações de falha no estabelecimento do LSP, o tempo para que as mensagens de erro sejam trocadas também é maior do que no estabelecimento de um único LSP. Esse atraso pode ser um problema para os mecanismos de restauração. Nessa abordagem, o dobro de *overhead* no plano de controle é gerado, uma vez que há o dobro de mensagens transmitidas. Além disso, como os recursos são alocados em diferentes processos, a probabilidade de bloqueio é significativamente maior.

O GMPLS permite o estabelecimento de uma conexão bidirecional simétrica (ou seja, com os mesmos parâmetros de engenharia de tráfego) com apenas um processo de sinalização. Conforme é especificado na (RFC3473, 2003), esse tipo de conexão é sinalizada através da presença do *Upstream_Label object* na mensagem de *Path*, indicando aos LSR's de *downstream* que está sendo estabelecida uma conexão bidirecional simétrica. O conteúdo do objeto *Upstream_Label* é o rótulo que o LSR de *downstream* deve utilizar para enviar os dados no sentido *upstream*. Se este rótulo (recurso) não for possível de alocar, uma mensagem de *PathErr* com a indicação "*Routing problem/Unacceptable label value*" é enviada no sentido de *upstream*, junto com o *Acceptable_Label_Set object*, com o conjunto de rótulos que o LSR de *downstream* pode alocar para transmitir os dados no sentido *upstream*.

3.5.5 LSP's Hierárquicos

Conforme a seção 3.4.7, uma rede é particionada em diferentes regiões de acordo com a tecnologia de comutação utilizada pelos equipamentos. Na Figura 3-8 é apresentada uma rede composta por duas regiões. Os equipamentos TDM (nós A, B, C, F, G e H) estão ligados por um *backbone* WDM (nós D, E, J e I). A separação por regiões e a identificação de seus limites é importante para a sinalização. Os LSP's são sinalizados de maneira diferente, pois os objetos de sinalização possuem formatos e semântica dependente da região. Além disso, os processos relacionados à descoberta de enlaces, roteamento e computação de rotas são diferentes para cada região.

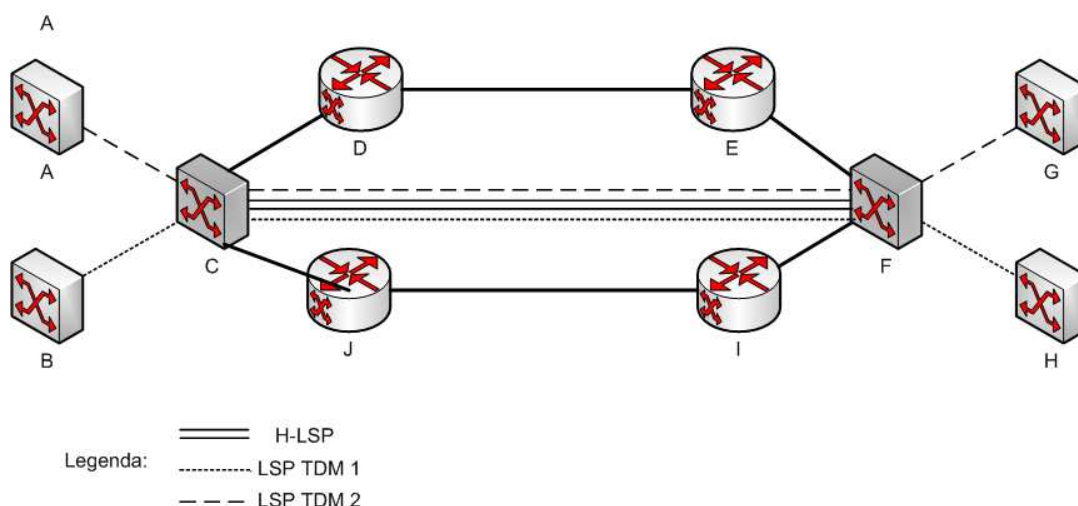


Figura 3-8: Estabelecimento de LSP's por uma rede multi-região

É possível utilizar uma instância do plano de sinalização para cada região, através do modelo de sobreposição. Assim, as questões sobre sinalização estariam resolvidas. No entanto, este nem sempre é o modelo ideal.

O problema na sinalização surge no estabelecimento de um LSP. Suponha que se deseja estabelecer um LSP para transportar os dados utilizando um serviço SDH do nó A ao G. A computação do caminho no nó A precisa restringir a seleção para usar apenas enlaces TDM. No entanto, não há uma seqüência de enlaces TDM entre os nós A e G, pois, como mostra a Figura 3-8, no núcleo existem apenas canais WDM. Suponha que seja forçada a seleção do caminho, por exemplo, ACDEFG. Pode acontecer um erro no estabelecimento se os nós que fazem limite entre as duas regiões (C e F) não tiverem as funções de adaptações que inserem e retiram a carga

útil do SDH em um comprimento de onda. Se a função de adaptação existir, o LSP é estabelecido, porém com um problema de escalabilidade: todo o comprimento de onda estará dedicado àquele LSP, ou seja, ao transporte de um único fluxo SDH. Nesse caso apenas uma pequena fração da largura de banda daquele comprimento de onda é utilizada e nenhum outro LSP TDM poderá utilizar a largura de banda excedente.

Este problema é resolvido através do uso de um *LSP Hierárquico (H-LSP)*. Quando a mensagem de *Path* chega ao nó C, ele reconhece que o LSP está entrando em uma região servidora. Nesse momento, ele suspende temporariamente o estabelecimento do LSP TDM e inicia o estabelecimento de um H-LSP (neste caso um LSP LSC) pelo domínio da camada servidora, entre os nós C e F. Após ser alocado, o H-LSP é usado como um enlace TDM de dados. O nó C reinicia o processo de sinalização da região cliente através do envio da mensagem de *Path* ao nó F, ou seja, o nó de egresso da H-LSP, estabelecendo assim a LSP TDM 1 entre os nós ACFG. Para o LSP TDM, a H-LSP da região servidora é transparente, considerando-a como um enlace entre os nós C e F.

O H-LSP é anunciado no plano de roteamento como um *Traffic Engineering (TE) link* TDM que pode ser utilizado para o estabelecimento de outros LSP's TDM, como o LSP TDM 2 da Figura 3-8, resolvendo assim o problema do desperdício da largura de banda. Cria-se então um mecanismo de agrupamento e tunelamento de LSP's em H-LSP, fornecendo uma funcionalidade semelhante ao empilhamento de rótulos do MPLS-TE. Além disso, os H-LSP's criam um tipo de topologia virtual. No exemplo anterior, é criada uma topologia virtual TDM sobre a região LSC.

Um das restrições dos H-LSP's é que apenas uma região de maior grau pode agrupar uma região de menor grau, e nunca o contrário. Ou seja, um H-LSP TDM não pode ser utilizado para transportar um LSP LSC, mas um H-LSP LSC pode ser utilizado para transportar LSP's TDM, L2SC ou PSC. Assim, o agrupamento e tunelamento seguem a hierarquia descrita na seção 3.4.7.

3.6 ROTEAMENTO

Nas redes IP's, roteamento significa calcular o próximo salto para um pacote IP pelo menor caminho ao seu destino. Essa decisão é tomada individualmente em cada roteador com base em uma tabela de rotas, que pode ser preenchida manualmente ou por um protocolo de roteamento. O processo conhecido como roteamento no GMPLS não é exatamente o roteamento realizado em equipamentos do mundo IP, mas sim o processo de distribuição da informação que é utilizada como base para o cálculo dos caminhos pelos quais são estabelecidos os LSP's.

As redes de um modo geral podem ser particionadas horizontalmente em domínios administrativos, ou *Autonomous Systems (AS)*, que são porções independentes que oferecem um serviço de transporte entre suas fronteiras. Domínios distintos se comunicam por enlaces de dados entre seus roteadores de borda, permitindo o fluxo de dados entre eles. Além disso, um domínio pode conter um ou mais sub-domínios.

Os principais protocolos utilizados no roteamento intra-domínio no mundo IP são os protocolos de *link-state*, como o OSPF e o IS-IS. Cada roteador é responsável por distribuir informações sobre si e suas interfaces. Essas informações consistem principalmente no estado do enlace e no custo para transmitir em cada interface por um determinado enlace. Com as informações de todos os roteadores de um domínio, o protocolo de roteamento utiliza um algoritmo para calcular a rota para todos os outros roteadores, a fim de determinar o próximo salto. Os dados chegam ao seu destino, pois parte-se da premissa que utilizando o mesmo algoritmo os caminhos encontrados serão convergentes.

A engenharia de tráfego opera em um paradigma diferente, pois se baseia na transmissão por caminhos pré-computados. O objetivo da engenharia de tráfego é manter a rede des congestionada e balanceada. Isto é feito alocando caminhos para os LSP's que não são o ótimo, mas que atende aos requisitos de QoS de um determinado fluxo.

O protocolo de roteamento do plano de controle precisa representar as informações sobre os recursos do plano de transporte, que são guardadas no *Traffic Engineering Database (TED)*. O TED guarda através de uma estrutura de grafos todas as

informações necessárias sobre as entidades de transporte em um domínio, o qual é utilizado pelos algoritmos responsáveis pelo cálculo dos caminhos de um fluxo. O principal componente do TED é o *Traffic Engineering (TE) link*, o qual representa um recurso, ou um agrupamento de recursos, para propósitos de roteamento. Informações sobre os TE *links* são trocadas entre instâncias do protocolo de roteamento. Cada roteador é responsável por distribuir informações sobre estados dos enlaces que terminam nele, assim como redistribuir informações recebidas de outros roteadores.

No GMPLS, o controlador de roteamento é responsável por distribuir informações dos TE *links*, que representam recursos do plano de dados, e pelo processamento dessas informações para a construção do TED.

Agrupamento de Enlaces

Um TE *link* não precisa estar associado diretamente a um *enlace de dados*, mas sim a um agrupamento de *links* componentes. Um TE *link* formado por um agrupamento de *links* componentes é referenciado também como um TE *bundle*. O principal objetivo do agrupamento é diminuir a quantidade de informação mantida pelo plano de controle. Um TE *bundle* é tratado pelo plano de roteamento/sinalização da mesma forma que um TE *link* simples, ou seja, como uma entidade de transporte que irá compor as conexões de um LSP.

Por exemplo, se dois ROADMs estão conectados por 10 fibras, e considerando que existem 80 canais de dados em cada fibra, então, se cada canal for representado por um TE *link*, cada LSR do domínio terá que guardar informação de 800 TE *links* no TED. Além disso, haverá uma quantidade excessiva de informações trafegando pela DCN para sinalizar a existência e o estado dos TE *links*. No entanto, o agrupamento permite representar todas essas fibras e comprimentos de onda em um único TE *link*, melhorando a escalabilidade do plano de controle.

Tipicamente a identificação de um recurso na rede é feita utilizando a dupla <identificador do TE *link*, rótulo>. Por exemplo, se um TE *link* representa uma fibra

WDM, o rótulo irá identificar qual é o comprimento de onda utilizado. Porém, em alguns casos de agrupamento essa quantidade de informação não é o suficiente para identificar de forma unívoca um recurso. Segundo (RFC4201, 2005), são necessários três componentes para isso: <identificador do TE *link*, identificador do *link* componente, rótulo>. Por exemplo, se um TE link é formado pelo agrupamento de várias fibras WDM, então o identificador de *link* componente indica qual é a fibra, enquanto o rótulo representa o comprimento de onda utilizado.

Segundo a (RFC3945, 2004), existem dois requerimentos que os *links* componentes devem atender para que possam ser agrupados em um mesmo TE *link*: 1) as terminações de cada *link* componente devem pertencer ao mesmo par de LSR's e 2) que sejam o mesmo tipo de enlace, com as mesmas métricas e custos administrativos. O segundo requerimento torna-se mais óbvio no GMPLS: Um enlace TDM não deve ser agrupado com um enlace LSC no mesmo TE *link*, mesmo que possuam os mesmos LSR's em suas terminações, pois apresentam características próprias, como, por exemplo, o fato de o enlace TDM possuir uma terminação digital em cada extremidade, enquanto que o enlace LSC pode não haver uma terminação digital. Além disso, não há restrições quanto a formação de um TE *link* que passe por diversos nós, como acontece nas H-LSP's.

O valor dos atributos de um TE *bundle* depende dos valores do atributo dos *links* componentes e do tipo do atributo. Por exemplo, suponha que os um TE *bundle* representa uma fibra WDM, onde cada link componente é um comprimento de onda. O valor do atributo largura de banda do TE *bundle* é igual a soma da largura de banda de todos os comprimentos de onda na fibra. No entanto, se alguns desses comprimentos de onda possuem diferentes esquemas de proteção, o TE *bundle* será anunciado com o valor do esquema que oferece maior capacidade de proteção.

É importante notar que um TE *bundle* é tratado pelo plano de roteamento/sinalização da mesma forma que um TE *link* simples, ou seja, como uma entidade de transporte que compõe as conexões de um LSP. O estado de um TE *bundle* (ativo ou inativo, em estado de falha) é determinado pelo estado dos *links* componentes. Se ao menos um dos *links* componentes estiver ativo, então o TE *bundle* também está ativo. Quando alguns dos *link* componentes estão inativos, o valor dos parâmetros do TE *bundle* deve ser formado pela sumarização apenas dos *link* componentes

ativos. A (RFC4201, 2005) descreve em detalhes como os atributos dos *link* componentes devem ser sumarizados em um TE *link* no (G)MPLS.

Informações adicionais dos TE *links* no GMPLS

Os enlaces de dados das redes de transporte possuem características que exigem a adição de novos atributos aos TE *links* anteriormente usados apenas nas redes de pacotes. Mesmo os atributos diretamente herdados em alguns casos apresentam algumas diferenças semânticas no GMPLS, devido principalmente à separação do plano de controle do plano de transporte.

Segundo (Farrel & Bryskin, 2006), um TE link no GMPLS apresenta os seguintes atributos:

- *Link Type*: Indica se é um TE *link* ponto-a-ponto ou ponto-para-multiponto (apenas TE *links* ponto-a-ponto são abordados no presente trabalho)
- *Link ID*: Para enlaces ponto-a-ponto é o endereço IP do controlador de roteamento do outro lado do enlace (pois o TE *link* é uma representação local um controlador). Esse endereço IP deve fornecer um meio de comunicação sempre visível com o controlador remoto e deve estar associado diretamente a um elemento do plano de dados. Se um controlador estiver associado a mais de um dispositivo, então ele deverá ter um endereço IP diferente para cada um deles.
- *Local interface IP address*: endereço IP da interface (portanto numerada) local. No entanto, diferente do MPLS onde o canal de dados e controle são os mesmos, é o endereço da interface no plano de dados, e não identifica mais as interfaces do canal de controle.
- *Remote interface IP address*: endereço IP da interface (portanto numerada) remota do TE *link*, no plano de dados.
- *Local link identifier*: Novo atributo, adicionado na (RFC4203, 2005), é o identificador não-numerado da interface local de um TE *link*. Possui a mesma função que o *Local interface IP address*.

- *Remote link identifier*: Novo atributo, adicionado na (RFC4203, 2005), é o identificador não-numerado da interface remota de um TE *link*. Possui a mesma função que o *Remote interface IP address*.
- *Traffic engineering metric*: valor do custo que um TE *link* (um arco) tem no grafo do TED.
- *Administrative Group*: um número de 32-bits que classifica os TE links em uma determinada “cor” para propósitos de restrições no cálculo de roteamento. Assim, é possível excluir os arcos de uma determinada cor em um dado momento, dependendo do tipo de serviço para o qual o caminho está sendo computado.
- *Link protection type*: Novo atributo, adicionado na (RFC4203, 2005), é utilizado para indicar se o TE *link* é protegido ou se ele é o enlace de proteção, bem como o mecanismo de proteção que está sendo utilizado.
- *Shared Risk Link Group (SRLG)*: Novo atributo, adicionado na (RFC4203, 2005), é um número de 32 bits que indica a qual o SRLG o TE *link* pertence. Os enlaces pertencem a um mesmo SRLG quando podem sofrer falhas devido a um motivo comum. Por exemplo, se dois TE *links* representam duas fibras que passam pelo mesmo tubo, então se ocorrer um rompimento do tubo os dois TE *links* iram falhar. Assim, eles pertencem a um mesmo SRLG relativo ao tubo.
- *Interface Switching Capability (ISC) descriptor*: Novo atributo, adicionado na (RFC4203, 2005) descreve as características das interfaces associadas ao TE *link*. Os campos deste indicam: o tipo de comutação da interface local (PSC, L2SC, TDM, LSC ou FSC), a codificação (mais específico da tecnologia, por exemplo, dizendo se é Ethernet, SDH) o valor máximo de banda que um LSP pode alocar e alguns atributos que dependem do tipo de comutação da interface, como, por exemplo, o valor mínimo que um LSP pode ser alocado, importante em redes com restrições na granularidade de alocação dos recursos.

No OSPF e no IS-IS, as mudanças para incluir os novos parâmetros são descritos nas recomendações (RFC4203, 2005) e (RFC5307, 2008), respectivamente.

Operação dos protocolos de roteamento no GMPLS

Para que os controladores de roteamento possam trocar informações sobre os TE *links* é necessário que se estabeleça um canal de comunicação em ambos os sentidos. É dito que existe uma adjacência de roteamento sempre que há a comunicação entre dois controladores para propósitos de roteamento. A troca de mensagens é feita através do IP, pelo canal de controle. Através da adjacência de roteamento um roteador informa aos seus vizinhos quais são os TE *links* que terminam nele, assim como as informações de TE *links* recebidas de outros vizinhos.

De maneira geral, no GMPLS o protocolo de roteamento é utilizado para trocar informações sobre os TE *links* que existem entre os nós da rede. Um dos requerimentos da engenharia de tráfego e do GMPLS é que todos os tenham informações sobre os TE *links* do domínio. Porém, não é exigido que todos os nós entendam todas as informações de engenharia de tráfego ou do GMPLS, apenas os que são responsáveis por distribuir essa informação e compilar a TED precisam saber processar esses dados. Isto é feito tornando a informação de TE ou do GMPLS *opaca*, ou seja, é uma indicação que diz “*esta informação de roteamento não é para você, apenas passe para seus vizinhos*”. Assim, a informação é processada apenas nos nós de interesse. Esse tipo de funcionalidade também é útil para trabalhar com sistemas legados, que não suportam o GMPLS.

Por exemplo, suponha uma rede TDM com um núcleo LSC, como a do exemplo dos H-LSP's (seção 3.5.5). Se na entrada da rede WDM existe um controlador de roteamento que realiza o cálculo do caminho óptico na camada (LSC), as informações sobre os enlaces TDM não são importantes para esse controlador. Porém, essa informação é útil para os controladores da camada TDM. Portanto, essa informação é passada de forma opaca pelo controlador da camada LSC e só é processada quando chega aos controladores da camada TDM.

O OSPF possui o *opaque Link State Advertisement* (LSA) exatamente para esse propósito. Junto deste estão os atributos que identificam o tipo de informação trafegada. No IS-IS novos objetos também foram definidos para identificar uma informação opaca, bem como os novos atributos dos TE *links* para o GMPLS.

3.7 GERÊNCIA DE ENLACES

Nas redes ópticas, por exemplo, um par de nós pode estar ligado por dezenas de fibras, que com uso da tecnologia WDM cada uma dessas fibras pode transportar dezenas ou centenas de comprimentos de onda. Por isso o agrupamento de enlaces apresentado anteriormente é importante. No entanto, ainda é necessário atribuir identificadores para cada um dos *links* componentes, bem como monitorá-los. Realizar essas operações via configuração torna-se uma tarefa inviável. No exemplo anterior, com apenas dois nós, seria necessário definir milhares de identificadores manualmente.

O *Link Management Protocol* (LMP), definido na (RFC4204, 2005) é um protocolo criado no contexto do GMPLS, que, dentre outras funções, está a de identificar quais são os enlaces existentes no plano de dados e de realizar a troca de identificadores entre os dois nós que contêm o enlace. Ele também é responsável por identificar como esses enlaces serão agrupados. Após realizar o agrupamento e a troca de identificadores, essas informações são fornecidas para o controlador de roteamento, que irá distribuir as informações dos TE *links*.

No MPLS, a gerência dos enlaces de dados é feita através do envio periódico de mensagens de *Hello*, pelo protocolo de roteamento ou de sinalização, pois o canal utilizado para enviar as mensagens dos protocolos do plano de controle ou de sinalização é o mesmo. Além disso, no MPLS cada LSR possui uma instância dos protocolos de sinalização e roteamento. Com a separação do plano de controle e roteamento, o envio periódico de mensagens de *Hello* não irá verificar o estado do *enlace de dados*, pois essas mensagens passam pelo canal de controle. O LMP possui um processo de gerência dos canais de controle que se baseia na troca de mensagens de *Hello*. Segundo (Farrel & Bryskin, 2006), através desse mecanismo é possível realizar a verificação e o isolamento de falhas.

Há ainda no LMP dois processos opcionais, um para a verificação e descoberta dos enlaces do plano de dados e outro para o isolamento de falhas no plano de dados. O ultimo é particularmente útil quando o GMPLS está sendo usado em redes ópticas com dispositivos transparentes.

3.8 TRABALHOS RELACIONADOS AO PLANO DE CONTROLE

O sucesso do MPLS e o crescimento das redes WDM têm incentivado os pesquisadores a realizar estudos e propor soluções de plano de controle aplicado às redes WDM.

(Yoon & Kim, 2008) propuseram um esquema de alocação dinâmica de conexões em uma rede OTN com base no plano de controle do GMPLS. A Figura 3-9 representa a arquitetura das redes de transporte e controle, onde a primeira pode ser dividida em múltiplas sub-redes para a visualização no plano de controle. Uma *User Network Interface* (UNI) é implementada para que uma rede cliente possa requisitar um serviço de transporte ao plano de controle. É proposto também que a rede de controle seja implementada por uma rede Ethernet (embora não obrigatoriamente) e que seja separada da rede de transporte. Cada nó da rede de controle é um servidor que possui um conjunto de processos de sinalização e roteamento para configurar os elementos da rede de transporte para estabelecer as conexões e assim um caminho óptico entre as UNI's origem e destino.

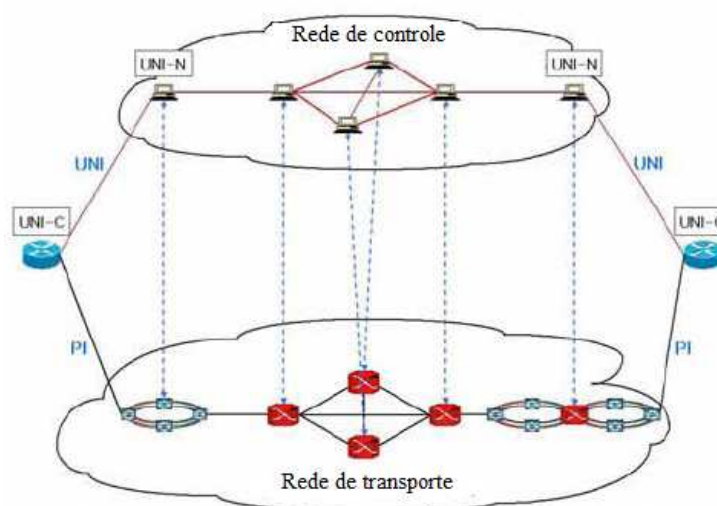


Figura 3-9: Arquitetura de rede para uso do plano de controle

Fonte: (Yoon & Kim, 2008)

Embora (Yoon & Kim, 2008) tenha objetivos semelhantes ao desta dissertação, ele apresenta alguns pontos fracos em particular. Em primeiro lugar, (Yoon & Kim, 2008) especifica uma arquitetura com os elementos (ex.: controladores, OXC's) que devem ter na rede, mas não especifica em detalhes quais são os protocolos e extensões

que devem ser utilizados na sinalização e no roteamento. Em segundo lugar, o plano de transporte especificado é uma rede óptica onde os nós (OXC's ou ROADM's) são descritos de uma forma funcional e simplista, sem basear-se em na arquitetura OTN proposta pela ITU na recomendação G.872 (ITU-T, G.872, 2001).

Outro trabalho relativo ao uso do GMPLS para redes OTN é proposto em (C. Santos, D. Santos, & C. R. F. Oliveira, 2008), onde um controlador com o plano de controle GMPLS é utilizado para controlar um ROADM da rede OTN. O controlador é dividido em três componentes: 1) o Elemento de Manipulação de Requisições (EMR), responsável por obter a topologia da rede controlada e realizar o gerenciamento/agendamento das requisições dos caminhos ópticos, 2) o Elemento de Cálculo de Rotas (ECR), responsável por calcular uma rota para determinada requisição e 3) o Elemento de Controle de Equipamentos (ECE), responsável pelo envio e processamento das mensagens de sinalização do GMPLS (seção 3.5), bem como a configuração dos equipamentos da rede de transporte. A Figura 3-10 exemplifica como é a troca de mensagens entre os elementos. Inicialmente um cliente (CL1) realiza uma requisição ao EMR de um caminho óptico para o cliente CL2. Após o ECR calcular a rota, o EMR devolve ao CL1 a rota e a sinalização e alocação do caminho é feita entre os nós CL1, ECE1, ECE2, ECE3 e CL2.

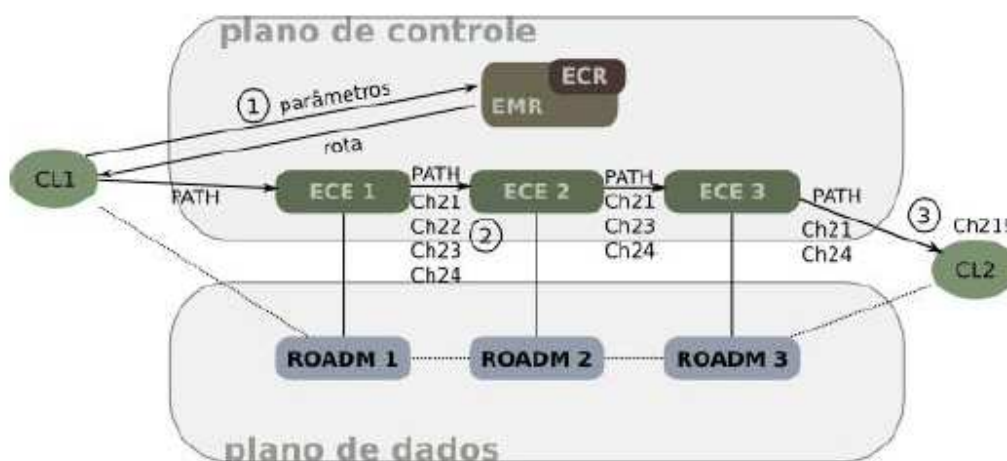


Figura 3-10: Estabelecimento de um caminho óptico
Fonte: (C. Santos, D. Santos, & C. R. F. Oliveira, 2008)

Para testar a solução proposta (C. Santos, D. Santos, & C. R. F. Oliveira, 2008) realiza uma demonstração experimental em uma rede com ROADM's de grau 2.

Embora os processos da sinalização estejam bem especificados, o ECE é específico ao equipamento do plano de transporte utilizado, e não genérico a qualquer equipamento OTN.

Em (Zhang & Bao, 2009) encontra-se um estudo dos protocolos do GMPLS quando utilizados para controlar uma rede óptica WDM. No entanto, não são especificados quais são os processos, mensagens, parâmetros das mensagens e outros detalhes necessários para controlar uma rede óptica WDM, ou seja, é apresentada apenas uma visão geral dos elementos do GMPLS e como eles podem ser usados para alocar caminhos ópticos em uma rede óptica WDM. Um dos objetivos do presente trabalho é justamente dizer quais são os componentes dos protocolos do GMPLS necessários para estabelecer caminhos ópticos em uma rede OTN.

De maneira geral, (Yoon & Kim, 2008) e (C. Santos, D. Santos, & C. R. F. Oliveira, 2008), assim como outros trabalhos de plano de controle GMPLS que não foram citados aqui, consideram uma rede OTN apenas como um conjunto de elementos ópticos WDM conectados que multiplexam diversos comprimentos de onda em uma fibra, mas não como uma arquitetura de rede baseada nos padrões da ITU, o que pode tornar suas soluções muito específicas, simplista ou incompleta, como também dependentes dos testes realizados. Assim, o presente trabalho tem como um de seus objetivos mostrar que detalhes específicos da OTN devem ser avaliados para uma correta implementação do plano de controle, para que este seja futuramente compatível com qualquer equipamento que seja implementado de acordo com os padrões da ITU para OTN.

4 PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DO PLANO DE CONTROLE GMPLS PARA OTN

Neste capítulo é apresentada uma proposta de uso do plano de controle GMPLS para redes OTN. Inicialmente é feito um levantamento de uma série de questões que precisam ser respondidas quanto à interação entre as duas tecnologias. O restante do capítulo tem como objetivo responder a esses questionamentos e apresentar uma proposta de solução para o estabelecimento de caminhos ópticos pela rede OTN.

De um modo geral, a proposta tem como objetivo realizar o estabelecimento de caminhos ópticos em uma rede OTN, ou seja, de estabelecer LSP's na hierarquia óptica da OTN. Este trabalho não inclui o estudo do uso do GMPLS para controlar os esquemas de multiplexação TDM da camada ODU. Neste contexto, a hierarquia digital da OTN tem como função apenas encapsular o sinal cliente.

4.1 QUESTÕES GERAIS

A seção 3.1 apresenta uma arquitetura funcional do GMPLS que pode ser utilizada em uma rede de transporte genérica. No entanto, ao utilizar os processos do plano de controle para estabelecer circuitos em uma rede OTN, uma série de questões que não são abordadas diretamente nas recomendações do IETF (embora as recomendações forneçam o caminho para as respostas) precisa ser solucionada. O resto da seção pretende responder aos seguintes questionamentos:

- Como os recursos da rede OTN são representados pelo plano de controle? Quais entidades guardam essas informações?
- No caminho contrário: O que um é um TE *link* em uma rede OTN? E um LSP, como ele é implementado na rede OTN?
- Como será o agrupamento de enlaces? E o endereçamento dos enlaces e interfaces OTN?

- Quem são os elementos de rede, os comutadores ou roteadores da rede OTN que são de responsabilidade dos controladores?
- E os processos de gerência de enlaces? Quais processos devem-se usar?

Muitas dessas perguntas podem ter mais de uma resposta, e todas corretas. Embora todas devam ser consideradas, para efeito de estudo de caso e simulação algumas decisões quanto a implementação foram tomadas.

Muitas dessas perguntas podem ter mais de uma resposta, e todas corretas. Embora todas devam ser consideradas, este trabalho prioriza a simplicidade e eficiência, mas sem perda das funcionalidades mínimas necessárias de um plano de controle, descritas no capítulo 3.

4.2 TIPOS DE LSP'S NA OTN

Na arquitetura OTN as camadas que podem ter uma interface direta com a camada cliente são a ODU, da hierarquia digital, e a OCh, da hierarquia óptica. Na Figura 4-1, um sinal cliente pode ser modulado diretamente em um comprimento de onda na camada OCh (salvo algumas adaptações), ou passar por uma multiplexação TDM juntamente com outros sinais, e serem transmitidos pela camada ODU. Assim, uma rede OTN não precisa necessariamente implementar a hierarquia digital. Em algumas redes baseadas no padrão OTN, a hierarquia digital é utilizada apenas por fornecer os mecanismos de FEC da camada OTU, mesmo sem fazer multiplexação TDM com outros sinais na ODU.

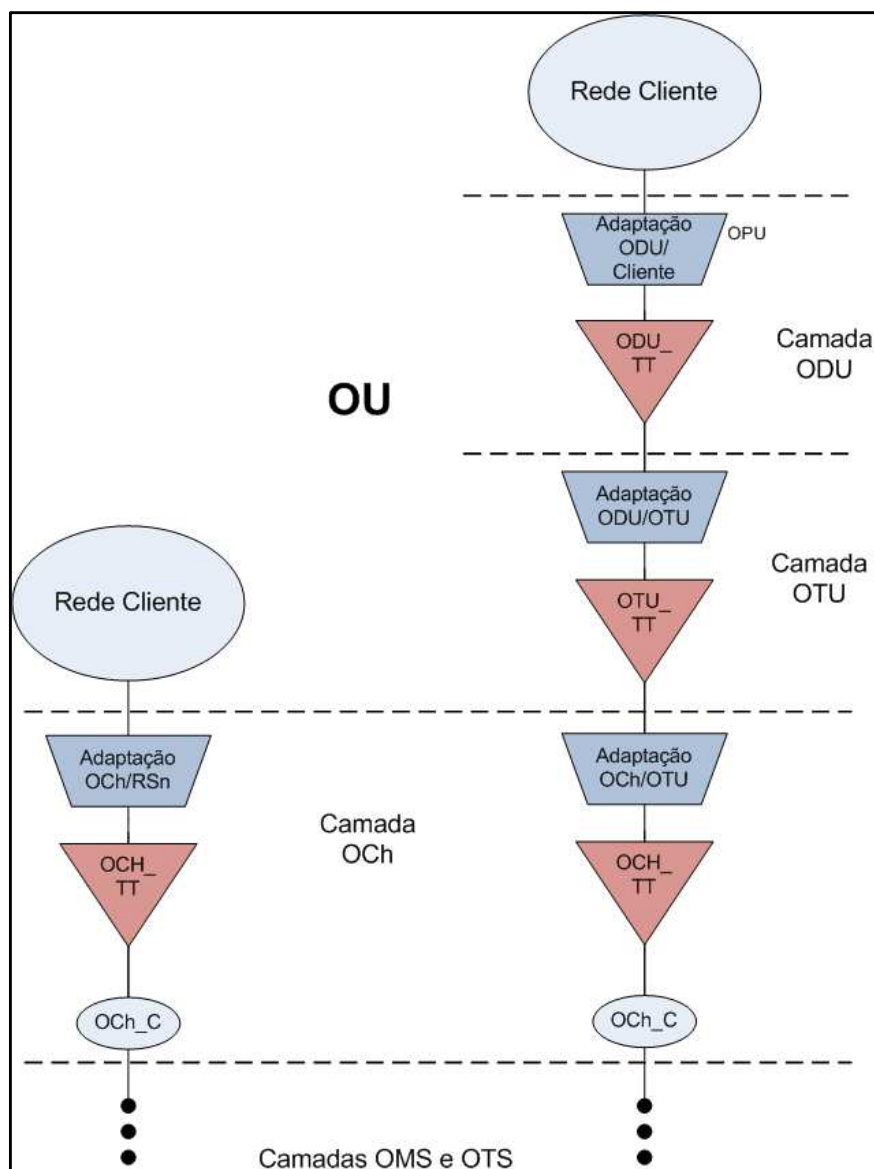


Figura 4-1: possíveis formas de transmissão por uma rede OTN

Assim, as redes OTN oferecem dois tipos de serviços de transporte fim-a-fim: 1) o digital, na camada ODU e 2) o óptico, na camada OCh. Considerando que o GMPLS fornece um serviço fim-a-fim aos clientes através dos LSP's, então a arquitetura OTN permite o estabelecimento de dois tipos de LSP's, um TDM no nível digital e outro LSC no nível óptico. Os limites de um LSP da camada digital correspondem no plano de transporte, ao início e fim de uma trilha ODU, enquanto que os limites de uma LSP da camada óptica são o início e fim de uma trilha OCh. Daqui em diante, um ODU LSP é o serviço fim-a-fim fornecido pela camada ODU, enquanto que o OCh LSP será o serviço fornecido pela camada OCh.

4.3 REPRESENTAÇÃO DA OTN NO PLANO DE CONTROLE

O plano de controle possui o seu próprio modelo de representação do plano de transporte, permitindo o uso de uma linguagem comum entre os controladores. Por exemplo, um TE *link* é representado no plano de controle por um modelo de informação entendível por todos os controladores. Assim, quando as informações sobre os recursos da rede de transporte (representados pelos TE *links*) forem trocados entre controladores, cada controlador consegue entender as informações provenientes do nó vizinho.

Porém, cada controlador associado a um ou mais elementos do plano de transporte precisa entender o que está sendo controlado por ele. É necessário que o controlador possa identificar quais são as conexões, interfaces, identificadores dessas interfaces, a capacidade de seus enlaces, os tipos de enlaces de dados e outras informações a fim de que o modelo criado represente corretamente a rede controlada.

4.3.1 Informações para o plano de roteamento

Como foi mencionado na seção 3.6, o plano de roteamento utiliza os TE *links* para representar os recursos de transporte no plano de dados, os quais são armazenados no TED. Os TE *links* são os componentes utilizados no cálculo dos caminhos de um LSP: cada TE *link* será uma das conexões que formam um LSP. Assim, para identificar um possível TE *link* no plano de transporte deve-se identificar qual recurso pode ser uma possível conexão de um LSP. Para representar a OTN no TED é necessário identificar quem são os nós do grafo e quem são os TE *links*.

Conforme a modelagem da recomendação (ITU-T, G.805, 2000), o menor componente que compõe uma trilha são as conexões de enlace (os LC's, ver seção 2.3.3). Uma trilha também pode ser formada por conexões sub-redes (SNC), que é na verdade um elemento composto, formado por LC's e também outros SNC's. Se uma trilha ODU ou OCh são os LSP's no plano de transporte, então todos esses elementos são candidatos para serem um *link* componente ou um TE *link*, desde que pertençam a essas camadas.

que interfira no fluxo do sinal WDM. No entanto, o amplificador de linha pode mudar algumas propriedades do sinal, por exemplo, aumentando a relação sinal ruído, informação que pode ser útil para esquemas mais sofisticados de cálculo de caminhos ópticos.

Proposta de agrupamento de enlaces

Um TE *link* da camada óptica (OCh TE *link*) pode ser formado de diversas formas, como mencionado anteriormente. A solução mais simples é que cada TE *link* represente um OCH_LC. Porém haveria um grande *overhead* para o plano de roteamento dado o grande número de comprimentos de onda em uma fibra.

Como todos os OCH_LC's de uma trilha OMS possuem as mesmas características e atendem os dois requerimentos necessários para que sejam *link* componentes de um mesmo TE *link* (seção 3.6, em agrupamento de enlaces), esses OCH_LC's devem ser agrupados em um mesmo TE *link*. Em outras palavras, um TE *link* é uma trilha da camada OMS, a qual representa o agrupamento de todos os comprimentos de onda transportados por uma mesma fibra entre dois ONE's que terminam a camada OMS. Portanto, abstraem-se os elementos como os amplificadores ópticos que terminam apenas a camada OTS.

Também é proposto que os OCH_LC's que pertençam a diferentes fibras (diferentes trilhas OMS), mesmo que possuam os mesmos LSR's em suas terminações, sejam representados por TE *links* diferentes. Embora essa medida diminua ainda mais o *overhead* e a troca de informações entre os controladores de roteamento, o agrupamento proposto apresenta certas vantagens em termos de simplicidade dos processos realizados pelo plano de controle, como é mostrado nas seções seguintes. De um modo geral, esta simplicidade está associada ao fato de que há um canal de controle para cada TE *link* nesse agrupamento (ver seção 4.4.1).

Deve-se lembrar não é o protocolo de roteamento quem toma a decisão de como é feito o agrupamento de enlaces, e sim o protocolo da gerência de enlaces. O protocolo de roteamento apenas representa e distribui a informação sobre TE *links* fornecidas pela gerência de enlaces.

O estudo de métodos de agrupamento de enlaces para as camadas digitais é deixado como sugestão de trabalhos futuros.

Restrições no TED

O TED deve conter também as informações de restrições de roteamento. No exemplo da Figura 4-3, suponha que se deseja alocar um LSP do host2 ao host3, passando pelos nós {OADM, OXC1, OXC3, Host3}. Se o OXC1 não possuir conversão de comprimento de onda, então o comprimento de onda alocado entre o OXC1 e o OXC3 precisa ser o mesmo comprimento de onda alocado entre o OADM e o OXC1. Essas informações de restrições são relativas aos nós do grafo e são retiradas das restrições da matriz de conexão da função OCH_C. Se um ONE não permite a conversão de comprimentos de onda, então a OCH_C só permitirá que OCh_LC's do mesmo comprimento de onda se "conectem", ou seja, que sejam colocados em série para compor uma trilha OCh (um OCh LSP).

Além restrições relativas aos nós no TED, algumas das informações dos TE *links* do GMPLS derivam das restrições imposta pela OTN. Por exemplo, segundo a (IETF, RFC4203, 2005), os campo *Minimum LSP bandwidth(1)* e *Maximum LSP bandwidth(2)* do atributo *ISC* indicam os valores mínimo e máximo de largura de banda que um LSP pode alocar, respectivamente. Na OTN essa é a menor taxa de transmissão que uma interface óptica transporta. Por exemplo, suponha que a interface do ONE que gera o sinal WDM suporte sinais de 2.5, 10 ou 40 Gbps. Então o TE *link* associado a essa interface deve ter (1) igual a 2.5 Gbps. O valor de (2) pode ser maior que 40 Gbps se for permitido utilizar mais de um comprimento de onda em paralelo para transmitir os dados de um LSP. Essas informações devem ser fornecidas pela gerência de enlaces ao protocolo de roteamento.

4.3.2 Informações para o plano de sinalização

Na sinalização GMPLS as informações relativas aos recursos da OTN estão na tabela de rótulos existente em cada LSR. Como mencionado anteriormente, um rótulo no GMPLS representa recurso físicos do plano de transporte que foi alocado

como um dos *link* componentes de um LSP, como por exemplo um *timeslot* ou um comprimento de onda. Portanto, o plano de sinalização precisa reconhecer qual é a região (PSC, L2SC, TDM, LSC e FSC) para escolher a forma correta de representação dos recursos (o tipo de rótulo). Quando os LSR's pertencem à hierarquia óptica da OTN (como os OXC's e ROADM's) o plano de sinalização estará operando na região TDM, estabelecendo OCh LSP's. Quando os LSR's pertencem a hierarquia digital (por exemplo, nós que realizam a conversão O-E-O antes de rotear o sinal, semelhante aos comutadores do SDH), é identificada a região TDM e o estabelecimento de ODH LSP's. Para cada região deve haver um tipo de tabela de rótulos, já que indicam recursos de características físicas diferentes. No presente trabalho é analisada apenas a tabela de rótulos da hierarquia óptica da OTN.

Quando um rótulo de entrada está disponível na tabela de rótulos significa que o comprimento de onda que ele representa não foi reservado ainda para o LSR de *upstream*, portanto tem-se um comprimento de onda disponível. Quando um rótulo de saída está disponível significa que se tem um comprimento de onda disponível para uso com o LSR de *downstream*. Nesse contexto a tabela de rótulos precisa obter do plano de transporte informações sobre quantas são as portas (as fibras com um sinal WDM no padrão OTN) de entrada e saída, qual a capacidade dessas (quantos e quais são os comprimentos de onda) e quais as restrições quanto a alocação desses comprimentos de onda, para garantir a correta representatividade da rede OTN. A parte de restrições funciona exatamente como no TED.

4.4 CONTROLADORES E O CANAL DE CONTROLE

Uma das principais diferenças entre o GMPLS e o MPLS está na separação do plano de controle do plano de transporte. O controlador é o componente arquitetural responsável por um ou mais elementos do plano de transporte que se comunicam através da DCN.

Na arquitetura OTN, o OSC, diferente dos outros sinais WDM, possui conversão O-E-O em cada terminação da trilha OTS, ou seja, em todos os nós da rede OTN. Esta

conversão é necessária porque os processos de supervisão e geração de alarme definidos na (ITU-T, G.798 , 2006) precisam acessar os cabeçalhos das camadas ópticas em cada nó. Como o seu formato específico não é definido e deixado para estudos futuros, propõe-se que o OSC seja compartilhado com o plano de controle para transportar as mensagens dos protocolos do GMPLS. Assim, o OSC é o canal de controle do GMPLS.

Segundo (IETF, RFC3945, 2004), o GMPLS não especifica o formato do canal de controle, mas é exigido que se use o IP para transportar as mensagens dos protocolos de sinalização e roteamento pelo canal de controle. A DCN é então implementada por uma rede IP, onde cada nó é um ONE da rede OTN, como mostra a Figura 4-4. Os processos de supervisão da OTN e os protocolos do plano de controle são elementos de software que pertencem à camada de aplicação do IP. Assim, para enviar uma mensagem pela DCN, o IP encapsula esses sinais, que podem ou não usar um protocolo de transporte, como o *User Datagram Protocol* (UDP) ou TCP. O IP é responsável por rotear pela DCN as mensagens do plano de controle até o controlador destino. O OSC é gerado em uma interface da camada 2 do IP, *Point-to-Point Protocol* (PPP) ou Ethernet, que esteja adaptada para modular em um sinal óptico. De maneira geral, o OSC é apenas o meio físico para estabelecer uma conexão ponto-a-ponto entre os nós da rede IP.

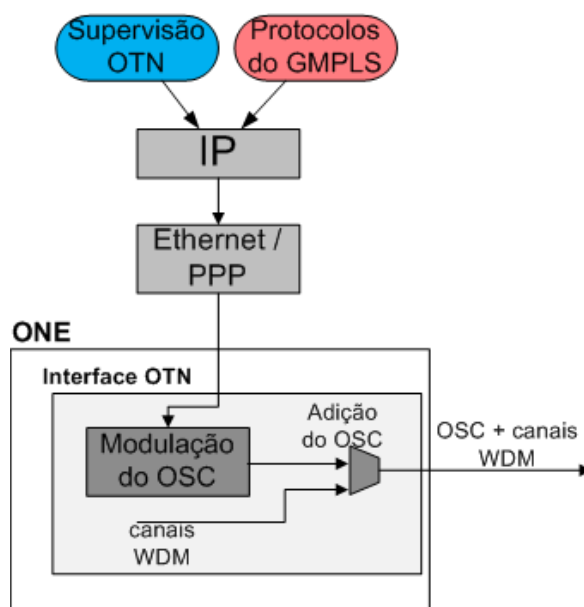


Figura 4-4: Implementação do canal de supervisão

Em muitas situações o controlador GMPLS, embora responsável por mais de um LSR do plano de controle, internamente possui uma instância dos controladores de sinalização e roteamento para cada LSR. Para simplificar os processos do plano de controle, é proposto que seja usado um controlador para nó da rede OTN (lembrando que os nós são aqueles que fazem terminação das camadas OTS e OMS). Além disso, a própria implementação da DCN propicia o uso de um controlador GMPLS por ONE, já que fornece um serviço de entrega de mensagens para cada nó da rede OTN.

4.4.1 Endereçamento

Endereçamento é o processo utilizado pelo plano de controle para identificar recursos dos planos de controle e transporte. Os recursos do plano de controle que precisam ser endereçados são os controladores e os canais de controle, e os recursos que devem ser endereçados no plano de transporte são os nós do TED, os TE links e os *link* componentes.

Como a DCN é uma rede IP, os controladores e os canais de controle utilizam o endereçamento IP (numerado) como identificador. O endereço IP do controlador o identifica unicamente dentro de seu domínio, além de permitir que ele seja localizado na DCN independentemente do estado de suas interfaces.

Como proposto, é utilizado um controlador por LSR. Com isso, a topologia da DCN possui quase mesma topologia do TED, ou seja, da representação da rede de transporte, pois os nós do grafo são os mesmos, com exceção daqueles que possuem apenas o supervisor da OTN no ONE (como o amplificador de linha). Como ilustra a Figura 4-5, no TED (endereços IP's ao lado dos LSR's e amplificadores) cada nó é representado pelo mesmo endereço IP do seu controlador GMPLS. No entanto, só existem controladores GMPLS nos ONE's que fazem terminação das camadas OTS e OMS (os OXC's e ROADMs) e não nos ONE's que terminam apenas a camada OTS (como os amplificadores de linha). Portanto, as terminações de um TE *link* são as mesmas terminações da adjacência de controle e são representadas pelos mesmos identificadores: os endereços IP's das interfaces dos controladores GMPLS (IP1.1 e IP2.1, no exemplo).

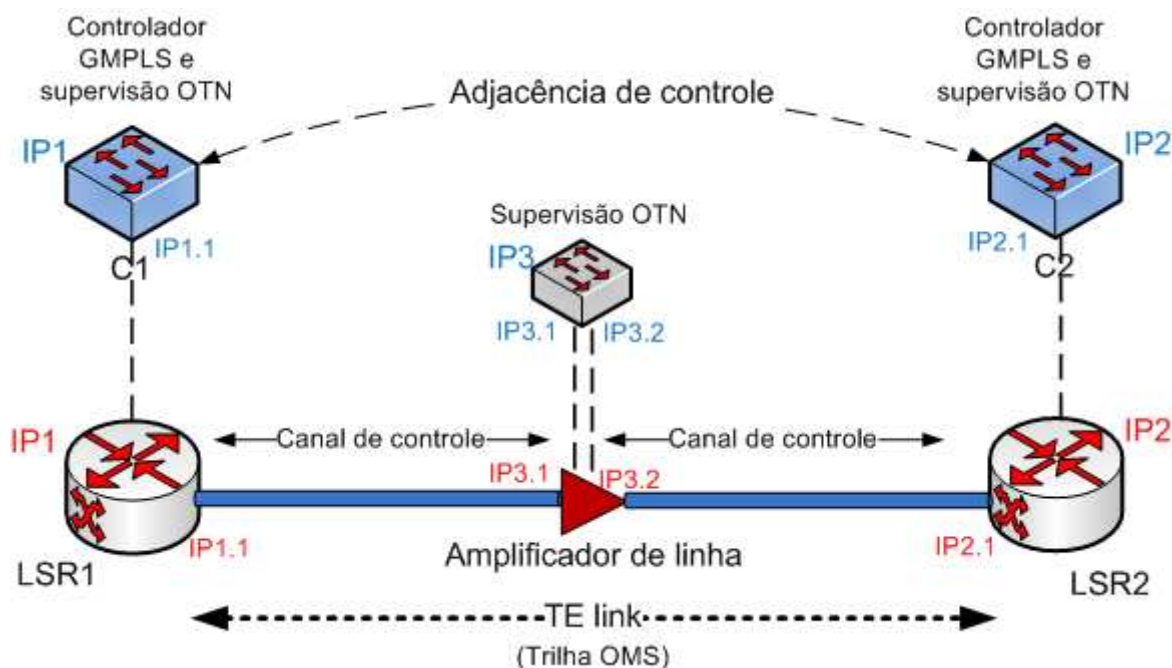


Figura 4-5: Exemplo de endereçamento dos recursos do plano de controle (em azul) e transporte (em vermelho).

Para cada interface OTN há uma interface da camada 2 do IP associada ao canal de serviço, que transmite os dados do plano de controle (ver Figura 4-4). Portanto, há um endereço IP diferente para cada terminação de TE *link*. Por exemplo, se uma fibra extra for adicionada entre os LSR's 1 e 2, então haverá duas adjacências de controle, dois TE links (duas trilhas OMS) e, portanto, 4 endereços IP's distintos para representar cada TE link, como, por exemplo, as duplas (IP1.1, IP2.1) e (IP1.2, IP2.2).

Por fim, o *link* componente de um TE *link*, que corresponde a um comprimento de onda na representação proposta, não é endereçado pelo plano de roteamento. No entanto, ele é identificado por um endereço de 32 bits pelo plano de sinalização, que corresponde ao rótulo GMPLS. Assim, um recurso da rede OTN pode ser unicamente identificado no plano de controle pela dupla <identificador do TE *link*, rótulo>.

4.5 GERÊNCIA DE ENLACES

Tradicionalmente a gerência de enlaces utiliza os processos do LMP definidos na (IETF, RFC4204, 2005). Nesta seção são apresentados os processos do LMP e feita uma análise quanto ao seu uso nas redes OTN. São analisados apenas os processos relativos à gerência de enlaces da hierarquia óptica da OTN.

4.5.1 Gerência do canal de controle

No LMP é definido um processo de gerência do canal de controle que tem como base o envio periódico de mensagens de *Hello* pelo mesmo. No entanto, é possível aproveitar o mecanismo já realizado pelo RSVP-TE, tornando o mecanismo do LMP desnecessário, pois seria uma sobreposição de funcionalidades.

No RSVP-TE (IETF, RFC3209, 2001) é definido um mecanismo que permite detectar se um nó vizinho está acessível ou não. Ao ser usado no GMPLS informa ainda se existe comunicação com o controlador vizinho e, portanto, se o canal de controle está ativo ou não. Como na proposta todos os LSR's possuem um controlador GMPLS com uma instância do RSVP-TE, então esse mecanismo pode ser aproveitado para detectar as falhas ocorridas no canal de controle.

Este processo é realizado pelo envio de duas mensagens pelo canal de controle: HELLO REQUEST e HELLO ACK. Cada nó pode escolher de forma independente o intervalo de verificação através do envio da mensagem HELLO REQUEST e o tempo de falha, ou seja, o tempo que deve esperar o recebimento da mensagem de HELLO ACK.

4.5.2 Descoberta e gerência dos canais de dados

Os processos de descoberta e de verificação de enlace do LMP baseiam-se no envio de mensagens pelo canal de dados. Porém, na hierarquia óptica da OTN, não é possível fazer a recuperação dessas mensagens, tornando necessário o uso de mecanismos mais sofisticados, como a modificação das propriedades de um sinal

óptico transmitidos, como é sugerido na (IETF, RFC4204, 2005). Este é um processo complexo e que foge ao escopo do presente trabalho.

Porém, como explicado na seção 4.4.1, os nós da topologia da rede de dados são os mesmos nós da rede de controle, e seus identificadores (os endereços IP's) são automaticamente obtidos pelo protocolo de roteamento. Como explicado anteriormente, um protocolo de roteamento, como o OSPF, guarda um mapa da topologia da rede, e como está nos controladores, essa é a topologia da rede de controle. Basta que ele use essas informações para construir o TED, pois ele já sabe quem são os nós e quantos são os TE *links* entre eles. Esta última informação é obtida pelo fato de que para cada adjacência do plano de controle (no caso, de roteamento) existe um TE *link* associado.

Até esse ponto, é sabido quais são os nós da rede e quantos são os TE *links* entre eles. A única informação que falta descobrir é qual é a capacidade e as propriedades dos TE *links* e de seus *link* componentes. Esta funcionalidade faz parte correlação de propriedades dos enlaces.

A verificação de enlace de dados do LMP é um processo opcional para verificar se os enlaces que não estão sendo usados estão ativos ou não. O processo é o mesmo do processo de descoberta da (IETF, RFC4204, 2005). No entanto, além de não ser possível acessar uma mensagem enviada por um enlace de dados entre dois LSR's puramente ópticos (pois não há conversão O-E-O), as redes OTN já possuem o seu próprio mecanismo de monitoramento e correlação de alarmes, que passam informações sobre o estado das trilhas para a gerência. Assim, é sugerido que essa informação seja obtida diretamente da gerência de redes OTN.

4.5.3 Correlação de propriedades dos enlaces

Corresponde ao processo responsável pelo endereçamento e agrupamento dos TE *links*. Este processo baseia-se na troca mensagens entre duas entidades do LMP localizadas nos controladores de LSR's adjacentes. A mensagem contém 1) os identificadores dos enlaces de dados (*link* componentes) e 2) os identificadores do TE *link*, local e remoto. Porém, para que isso seja feito, é necessário que já tenha

sido realizado um processo de descoberta e que as bases de dados de cada controlador já tenham essas informações. Aqui é proposto um processo simplificado dada as adaptações que foram realizadas no processo de descoberta.

Primeiro, os identificadores dos TE *links* e dos *link* componentes devem seguir o que foi proposto na seção 4.4.1, onde cada terminação do TE *link* recebe o endereço IP da interface do controlador que transmite dados pelo OSC. Assim que a DCN inicializar o LMP pode obter esses dados da gerência no próprio LSR, ou seja, não é necessária a troca de mensagens entre as entidades do LMP.

Até este ponto do processo já estão identificados os nós da rede, os TE links entre esses nós e os identificadores usados pelos nós e pelos TE *links*. Falta apenas obter informações sobre os enlaces de dados que compõem o TE *link*: quantos são os enlaces, qual a taxa de transmissão e quais são os seus identificadores.

Se todos os controladores do domínio utilizam o mesmo tipo de identificador de *link* componente (o mesmo rótulo), não há a necessidade de trocar esses identificadores entre dois controladores adjacentes, como é proposto no LMP. Basta descobrir qual é o tipo da interface OTN que está associada ao TE *link*. Na hierarquia óptica da OTN, significa descobrir qual é a taxa de transmissão de cada comprimento de onda e qual o número de comprimentos de onda que são multiplexados na camada OMS (os valores de n e m do OTM n . m). Essa informação pode ser obtida via configuração ou automaticamente no próprio LSR.

Quanto aos identificadores dos *link* componentes (ou seja, dos OCh_LC's da mesma trilha OMS agrupados em um TE *link*), como sugerido na seção 4.4.1, utiliza-se um número de 32 bits, onde o número de valor 0 (zero) representa o primeiro comprimento de onda da fibra, enquanto que o valor $n-1$ o representa o último comprimento de onda (considerando que a interface OTN multiplexa n comprimentos de onda na camada OMS).

Com a identificação do tipo de interface OTN utilizada e também dos *link* componentes, o TED pode preencher os parâmetros dos TE *links*. Por exemplo, o valor da largura de banda do TE *link* é computado pela soma de da taxa de transmissão de cada *link* componente. Outros parâmetros que representam

restrições aos TE *links*, específicos da tecnologia de transporte, também são fornecidos, como está exemplificado na seção 4.3.1 (em restrições no TED).

Em suma, os processos de gerência de enlaces proposto baseia-se na forma como é feito o agrupamento de enlaces, o endereçamento e o uso dos controladores do plano de controle do GMPLS, propostos nas seções anteriores.

4.6 SINALIZAÇÃO DOS LSP'S E EXTENSÕES UTILIZADAS DO RSVP-TE

O RSVP-TE é adotado como protocolo de sinalização devido à decisão tomada pelo IETF na (IETF, RFC3468, 2003). Esta seção tem como objetivo apresentar quais os processos das normas do IETF são necessários para estabelecer os caminhos ópticos em uma rede OTN, ou seja, os OCh LSP's.

A sinalização deve implementar os seguintes serviços:

- Estabelecimento de conexões bidirecionais;
- Controle explícito de rotas através do ERO;
- Controle de alocação de rótulos aprimorado.

A (IETF, RFC3473, 2003) especifica as extensões no formato e o tratamento das mensagens do RSVP-TE para atender os requerimentos da sinalização do GMPLS, descritos na (IETF, RFC3471, 2003). Como mencionado na seção 3.5.4, a mensagem de PATH deve incluir o objeto *Generalized Label_Request*, que através de seus atributos especifica em detalhes o tipo de LSP que está sendo estabelecido.

O estabelecimento dos OCh LSP's segue o processo descrito na seção 3.5.2, através do envio das mensagens de PATH e RESV entre os LSR's (os controladores) de ingresso e egresso. O LSP deve ser computado no LER de ingresso e os seguintes objetos referentes a sinalização generalizada (ver seção 3.5.4) devem ser utilizados na mensagem de PATH:

- ERO: indica o caminho a ser utilizado. Este deverá conter os sub-objetos *Label ERO* de *downstream* e *upstream*, definidos na (IETF, RFC3473, 2003), um para cada nó do caminho, indicando quais são os OCh_LSP's a serem

utilizados. Estes sub-objetos possuem o formato de rótulo descritos na seção 4.4.1.

- *Label_Set object* e *Upstream_Label object*: indicam os rótulos que devem ser alocados entre o LSR que recebe a mensagem de PATH e o LSR de *upstream*. São atualizados em cada nó com os valores dos sub-objetos *Label* e *ERO*. Como mencionado anteriormente, o objeto *Upstream_Label* só deve ser usado para o estabelecimento de LSP's bidirecionais simétricas.

O RSVP-TE deve usar o estilo *Fixed Filter* (FF) de reserva de recursos (IETF, RFC3209, 2001) para o estabelecimento dos OCh LSP's. No estilo FF, os recursos alocados para um fluxo (LSP) não são divididos com outros fluxos, assim como um OCh LSP não divide recursos com outro OCh LSP já que são diferentes comprimentos de onda. Então, o total de largura de banda alocado é igual a soma da taxa de transmissão de todas as reservas realizadas naquele *TE link* (na fibra). O estilo é definido no objeto *Style*, presente mensagem de RESV.

No apêndice A é apresentado em detalhes os objetos presentes nas mensagens de PATH e RESV, assim como a troca e o conteúdo dessas mensagens entre os controladores são apresentados no apêndice B.

4.6.1 Extensões do RSVP-TE específicas para OTN

A (IETF, RFC4328, 2006) propõe novas extensões à sinalização do GMPLS específicas à OTN, tomando como base a recomendação (ITU-T, G.709, 2003). Essas extensões são implementadas através de modificações nos parâmetros de tráfego de objetos descritos nas (IETF, RFC3471, 2003).

O *Generalized Label_Request*, definido na (IETF, RFC3471, 2003), inclui parâmetros comuns usados por todas as tecnologias de comutação e parâmetros de tráfego específicos à tecnologia, os quais são estendidos na (IETF, RFC4328, 2006).

Os parâmetros comuns estendidos do *Generalized Label_Request* que devem ser utilizados para o estabelecimento dos caminhos ópticos são (ver seção 3.5.4):

- *LSP Encoding Type*: parâmetro de 8 bits que indica se o LSP requerido pertence a camada OCh ou ODU. Na (IETF, RFC3471, 2003) os campos “digital Wrapper” e “lambda” indicam caminhos digitais e ópticos em uma rede WDM, porém sem especificar que o tipo tecnologia. O valor 13 deve ser usado para indicar o estabelecimento de um OCh LSP.
- *Switching Type*: parâmetro de 8 bits que indica o tipo de comutação que deve ser realizada em uma interface particular, o qual permanece o mesmo durante toda a mensagem de PATH. Pode indicar interfaces (valor 100 para o parâmetro já definido na (IETF, RFC3471, 2003)), ou interfaces LSC (valor 150 definido na (IETF, RFC3471, 2003)).
- *G-PID*: parâmetro de 16 bits que é estendido para permitir que uma carga útil ATM possa ser transportada por um ODU LSP, e que um quadro Ethernet ou SONET/SDH possa ser transportado por um OCh LSP.

No RSVP-TE, os parâmetros de tráfego específicos à OTN são transportados pelos objetos G.709 *Sender_Tspec*, na mensagem de PATH, e G.709 *Flowspec*, na mensagem de RESV. Esses objetos possuem o mesmo formato (embora sejam de classes diferentes). Quando é criada a mensagem de PATH alcança o LER de egresso, os valores dos parâmetros do *Sender_Tspec* devem ser copiados para o *Flowspec* e enviado na mensagem de RESV. Esses parâmetros são:

- *Signal Type (ST)*: parâmetro de 8 bits que indica o sinal elementar da LSP, ou seja, se é ODU1, ODU2, ODU3, OCh1, OCh2 ou OCh3. São usados os valores 6,7 e 8 do parâmetro, respectivos à camada OCh.
- *Number of Multiplexed Components (NMC)*: parâmetro de 16 bits que indica o número de sinais ODU tributários em um esquema de multiplexagem TDM. Esse parâmetro não é utilizado para o estabelecimento de OCh LSP's.
- *Number of Virtual Components (NVC)*: parâmetro de 16 bits, utilizado nos esquemas de concatenação virtual da camada ODU. Esse parâmetro não é utilizado para o estabelecimento de OCh LSP's
- *Multiplier (MT)*: parâmetro de 16 bits que indica o número de cópias do sinal que implementa o LSP. O valor 1 indica que há apenas uma instância do sinal a ser transmitida.

4.7 CONCLUSÃO

Enquanto as recomendações da ITU-T relativas à OTN se preocupam em apresentar uma arquitetura bem definida, o IETF apresenta o GMPLS como um *framework*, definindo protocolos e funcionalidades. O primeiro resultado é o relacionamento entre os termos da ITU-T e do IETF face as diferentes abordagens de descrição adotada pelos órgãos. Os termos do IETF LSP, TE *link*, LSR entre outros foram relacionados com componentes arquiteturais das redes OTN. Dessa forma, qualquer equipamento que esteja de acordo com as normas do ITU pode ser representado pelo plano de controle corretamente.

A proposta também identifica quais são as funcionalidades do plano GMPLS que devem ser adotadas para o estabelecimento dos LSP's no domínio óptico. Embora existam muitos objetos e processos novos, especialmente na sinalização, como mostra pode ser visto nas RFC's (IETF, RFC3471, 2003) e (IETF, RFC3473, 2003), nem todos precisam necessariamente ser utilizados. Isso se deve ao fato de que o GMPLS foi construído para ser aplicado em diversos tipos (TDM, LSC e FSC) e arquiteturas (Ex.: arquitetura com um controlador por nó, ou um controlador por domínio) de redes de transporte, dando flexibilidade para o fabricante adotar a solução mais conveniente. O uso de um controlador por nó da rede de transporte e o endereçamento adotado simplificaram os processos de descoberta, troca de informações de roteamento (os TE *links*).

Outra importante contribuição da proposta está na análise do LMP em uma rede OTN com dispositivos puramente ópticos. Os processos de descoberta de enlaces e verificação dos canais de dados especificados na (IETF, RFC4204, 2005) não se aplicam em redes onde não há conversão O-E-O. O presente trabalho propõe assim um novo mecanismo para esses processos (seção 4.5).

De maneira geral, esta dissertação apresenta uma proposta sobre como implementar um plano de controle GMPLS com base nas recomendações do IETF para as redes OTN, baseadas nas recomendações da ITU-T.

5 VALIDAÇÃO DA PROPOSTA

A validação da proposta de implementação do plano de controle GMPLS para redes OTN é feita através do desenvolvimento de modelos de simulação discreta no OMNET++. O objetivo deste capítulo é demonstrar a operação de uma rede OTN com controladores GMPLS baseados na proposta de implementação descrita no capítulo 4.

O plano de transporte, que inclui os equipamentos OTN e as fibras com os sinais WDM, é modelado utilizando-se as bibliotecas padrões do OMNET++. O plano de controle GMPLS é desenvolvido através de extensões do INET (INET Framework main page), que é um *framework* para o OMNET++ para simulação de redes. Após uma breve introdução sobre o simulador e a modelagem da OTN e do GMPLS, são apresentados os principais resultados obtidos com a simulação.

5.1 O SIMULADOR OMNET++

Segundo (Varga, Omnet++ main page), o OMNET++ é um *framework* e biblioteca de simulação de eventos discretos extensível, modular, *open-source*, desenvolvida em C++, com uma *Integrated Development Environment* (IDE) no Eclipse (Eclipse) e um ambiente gráfico de execução. Embora sua principal aplicação seja simulação de redes, o OMNET++ é um simulador genérico e pode ser aplicado, por exemplo, na simulação de sistemas distribuídos, validação de arquitetura de computadores, entre outras.

O INET é um *framework* com diversos módulos de simulação de redes do mundo IP incluindo, ao interesse do presente trabalho, o MPLS e seus protocolos de sinalização e roteamento.

5.1.1 Porque o OMNET++?

Em (L. Beeg, 2006) é realizada uma avaliação de diversos simuladores para redes *Next-Generation-Networks* (NGN). Essa pesquisa aponta o *Network Simulator version 2* (NS-2) e o OMNET++ como os dois grandes concorrentes do mundo *open-source*.

Um dos critérios de avaliação utilizados na pesquisa baseia-se na biblioteca existente de simulação do MPLS e do RSVP. Em (L. Beeg, 2006), o OMNET++ está em desvantagem devido as simplificações realizadas no desenvolvimento do RSVP. Porém, (Janota, 2005) realiza uma revisão nos módulos e passa a incluir os métodos de engenharia de tráfego da (IETF, RFC3209, 2001), trabalho o qual foi integrado posteriormente ao INET, superando as antigas limitações. Segundo (L. Beeg, 2006), o NS-2 também possui bibliotecas para simulação do MPLS e seus protocolos, mas que são providas de diversas fontes diferentes e que precisam ter sua credibilidade checada.

Além disso, no início do desenvolvimento deste trabalho a nova versão do NS (NS-3) não era compatível com a versão anterior e poucas bibliotecas de rede haviam sido portadas. O OMNET++, também em nova versão (a quarta), é compatível com toda a biblioteca do INET. Por esses motivos o OMNET++ foi escolhido como o simulador a ser utilizado no presente trabalho.

5.1.2 Conceitos básicos do simulador

Os dois principais elementos do OMNET++ são os módulos e as mensagens. Os módulos representam as entidades que se deseja simular, enquanto que as mensagens são objetos trocados entre os módulos através suas portas (*Gates*) e representam eventos no domínio simulado. Por exemplo, em uma rede IP típica, os módulos são os roteadores, computadores, *hubs*, e as mensagens podem representar os dados trocados entre esses elementos.

Os módulos se dividem em módulos simples ou compostos. Os módulos simples são atômicos, e possuem seu “comportamento” programado em C++. Entende-se por

comportamento as ações que o módulo realiza ao receber uma mensagem. Um módulo composto é formado pelo agrupamento de módulos simples ou outros módulos compostos, conectados através de suas portas, como mostra a Figura 5-1. A conexão desses elementos é feita em uma linguagem de descrição de rede (NED – *NEtwork Description Language*) criada para o simulador. Enquanto o comportamento dos módulos simples é descrito em C++, o comportamento do módulo composto depende de como seus elementos internos estão conectados e trabalham em conjunto. A topologia da rede simulada também é descrita na linguagem NED, de maneira simular a composição dos módulos compostos. Com isso, o OMNET++ provê uma boa separação entre descrição da topologia da rede e comportamento das entidades modeladas.

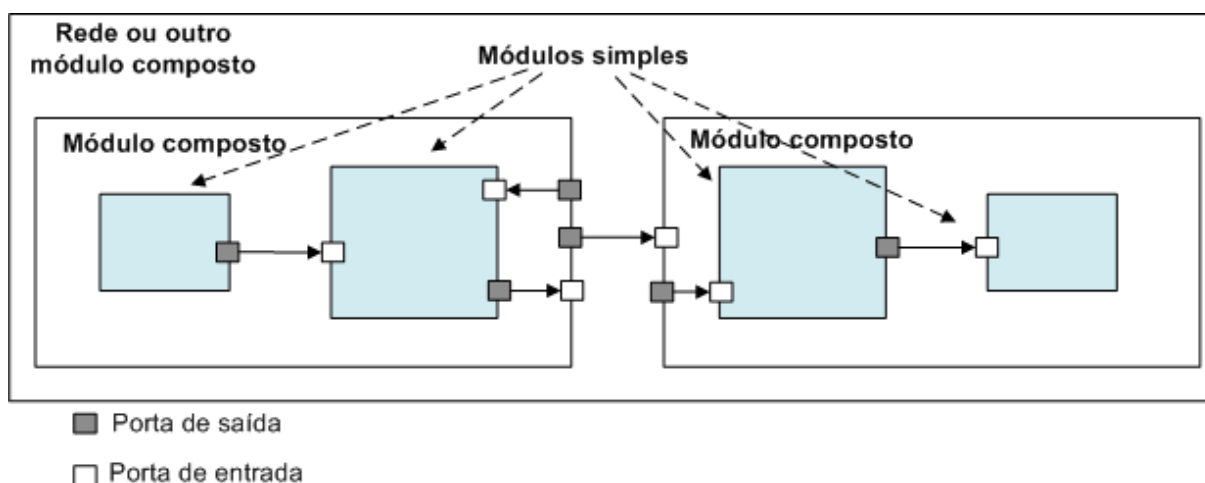


Figura 5-1: Relação hierárquica entre os módulos simples, composto e uma rede no OMNET++.

Fonte: (Perez, 2005)

5.2 MODELAGEM DO CANAL DWDM

No OMNET++ as mensagens são trocadas entre os módulos por canais, que podem ser de três tipos diferentes: 1) *IdealChannel*, um canal ideal sem atraso de propagação ou de transmissão, 2) *DelayChannel*, um canal apenas com atraso de propagação, e 3) *DatarateChannel*, um canal com atrasos de propagação, atrasos de transmissão e taxa de erro de bit. A Figura 5-2 exemplifica o tempo de envio de uma mensagem entre os nós N1 e N3, considerando a existência de um nó intermediário ao caminho utilizado N2, utilizando cada um desses canais.

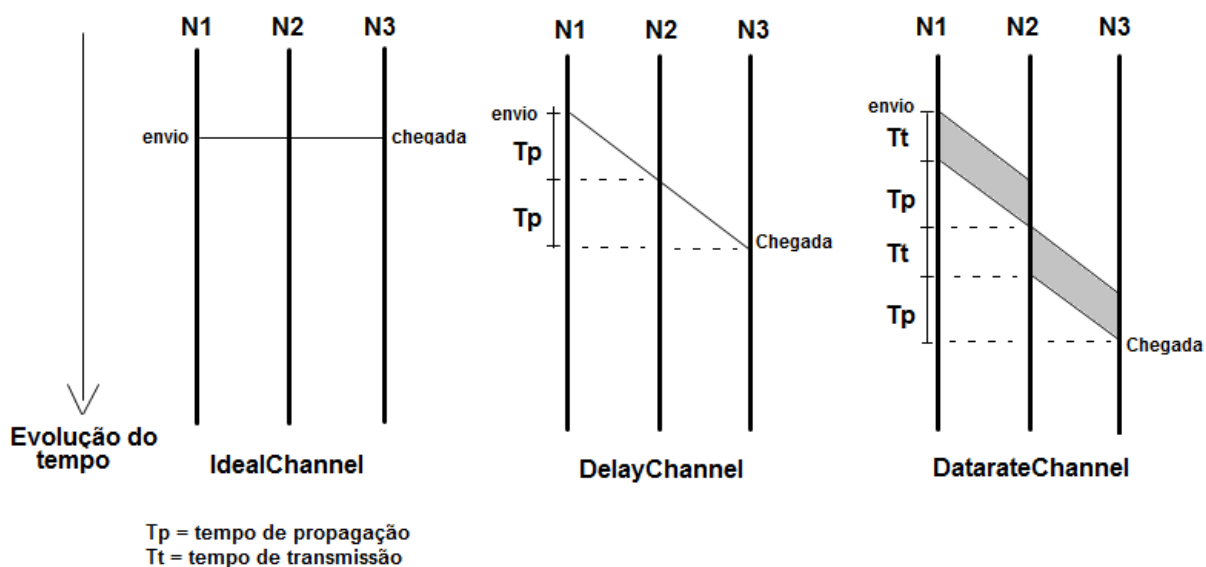


Figura 5-2: Comportamento no tempo do envio de mensagens pelos canais do OMNET++

O *IdealChannel* geralmente é usado para modelar a comunicação entre duas entidades onde qualquer tipo de atraso seja insignificante, como, por exemplo, a comunicação entre dois processos paralelos rodando em um mesmo processador. O *DatarateChannel* é o modelo mais usado na simulação de redes de computadores. No exemplo da Figura 5-2, se o nó N2 for um roteador, ele precisa primeiro armazenar o pacote, processar as informações do cabeçalho para somente depois enviar para o nó N3.

Para o presente trabalho é necessário modelar um canal que represente uma fibra por onde passam diversos comprimentos de onda independentes. Este tipo de canal não existe na *Application Programming Interface (API)* padrão do OMNET++, assim como também não há nos modelos de simulação dos contribuidores centralizados no *site* (Varga, OMNET++ models) do OMNET++. Apenas (White I. , Rogge, Shrikhande, & Kazovsky, 2003) faz uma modelagem de um sistema WDM, porém é muito específico para a proposta de hardware do artigo.

O canal WDM possui dois requisitos principais

- 1) Modelar um sinal óptico WDM em termos de potência do sinal óptico e relação sinal ruído;
- 2) Modelar o envio de diferentes sinais WDM de forma independente, permitindo que sejam transmitidos ao mesmo tempo.

Na modelagem realizada, cada sinal WDM é representado por uma mensagem do OMNET++, a classe *OTNMsg*. Quando uma *OTNMsg* é enviada pelo canal WDM, significa que existe um sinal óptico de um comprimento de onda específico sendo propagado pelo canal. A *OTNMsg* possui os seguintes parâmetros:

- *Wavelength*: indica o comprimento de onda do sinal que a mensagem representa;
- *Power*: a potência no sinal óptico
- *Signal Noise Ratio (SNR)*: relação sinal ruído
- *length*: número de bits do fluxo que a mensagem representa

Assim como um sinal elétrico, o sinal óptico sofre um atraso de propagação na fibra. O atraso de transmissão vai depender da quantização adotada, representada pelo parâmetro *length*. Por exemplo, se cada mensagem representar a transmissão de um bit, então o atraso de transmissão é o tempo gasto pela interface óptica para transmitir um bit. Na modelagem adotada, um quadro da camada OTU é transmitido por vez sobre um comprimento de onda, de forma contínua. Portanto, o tamanho adotado para a *OTNMsg* é de um OTUk, ou seja, 130560 bits de acordo com a recomendação (ITU-T, G.709, 2003).

O canal *DatarateChannel* modela os atrasos de propagação e transmissão, porém não permite que mais de uma mensagem seja enviada ao mesmo tempo no mesmo canal, ou seja, não há como representar a transmissão independente (muitas vezes ao mesmo tempo) de diferentes comprimentos de onda.

No OMNET++, cada canal é implementado por uma classe C++, assim como os módulos. Assim, é criada uma nova classe, baseada no *DatarateChannel*, O *OpticalChannel*. Este novo canal permite o envio de *OTNMsg's* simultâneas pelo canal, desde de que pertençam a diferentes comprimentos de onda, como também simula a queda de potência no canal e a mudança na relação sinal ruído. Os parâmetros de um canal do *OpticalChannel* são:

- *distance*: tamanho do canal (fibra)
- *powerdecrease*: taxa de queda de potencia dependendo da distância
- *datarate*: taxa de transmissão
- *ber*: taxa de erro de bit

A queda de potência é calculada com base na distância e na taxa de queda de potência da fibra. Quando uma *OTNMsg* entra no canal, ela possui um valor de potência (parâmetro *power*) que é decrescido de um valor ao atravessar o canal. A relação sinal ruído (parâmetro SNR da *OTNMsg*) aumenta cada vez que acontece uma amplificação.

Não é intuito do presente trabalho implementar uma modelagem completamente fiel à transmissão de sinais ópticos por uma fibra, mas sim de fornecer meios para que em trabalhos futuros esses cálculos sejam implementados com mais rigor.

5.3 MODELAGEM DOS EQUIPAMENTOS OTN NO OMNET++

A modelagem dos equipamentos OTN no OMNET++ tem como base o mapeamento apresentado na seção 2.3.5. Neste mapeamento, equipamentos como ROADMs, OXC's, amplificadores e linha e outros são modelados usando as funções de terminação de trilha e adaptação da recomendação (ITU-T, G.798 , 2006).

No OMNET++, os seguintes blocos funcionais da (ITU-T, G.798 , 2006) são implementados como módulos simples:

- As terminações de trilha da camada OTS, lados *sink* (OTSn_TT_Sk) e *source* (OTSn_TT_So);
- As funções de adaptação da camada OTS com a OMS *sink* (OTSn/OMSn_A_Sk) e *source* (OTSn/OMSn_A_So)
- As terminações de trilha da camada OMS, lados *sink* (OMSn_TT_Sk) e *source* (OMSn_TT_So);
- As funções de adaptação da camada OMS com a OCh *sink* (OMSn/OCh_A_Sk) e *source* (OMSn/OCh_A_So)
- A função de conexão da camada OCh (OCh_C)

Por serem módulos simples, todo o processamento e troca de sinais internos ao bloco é feito em um código C++. Já os sinais externos dos blocos funcionais são implementados pelo envio de mensagens entre os módulos. Apenas os sinais e componentes relacionados ao transporte da carga útil são modelados. Está fora do

2006). Na Figura 5-4 tem-se a visualização na IDE do OMNET do módulo do OXC. Os blocos que são utilizados e a maneira como são conectados seguem a modelagem descrita na seção 2.3.5 (ver Figura 2-11). Como o objetivo da simulação é validar a proposta apresentada para o plano de controle, apenas os módulos amplificadores de linha e OXC (e os blocos funcionais necessários) são modelados no OMNET++. No entanto, com a implementação dos blocos funcionais restantes, qualquer equipamento que segue as recomendações da ITU-T pode ser modelado e simulado.

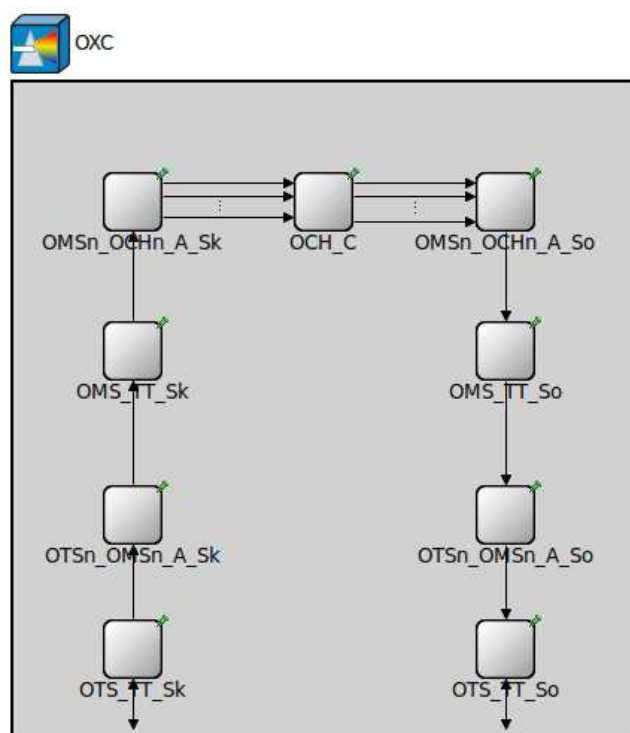


Figura 5-4: Modelo de simulação e representação visual de um OXC no OMNET++.

Observa-se que essa é uma abordagem funcional de modelagem dos equipamentos OTN. No mundo real, os OXC's, (R)OADM's, amplificadores de linha e outros equipamentos são compostos por um conjunto de elementos de hardware, como, por exemplo, de amplificadores ópticos, (de)multiplexadores e fotodetectores. Outra abordagem de modelagem seria implementar módulos no OMNET++ que representem esses elementos físicos e, a partir deles, construir modelos de equipamentos mais complexos como os OXC's e ROADM's. Essa não foi a abordagem adotada por dois motivos.

Primeiro, em alguns ONE's há um grande número de elementos de hardware, o que tornaria a simulação lenta, difícil de criar os módulos dos ONE's dado o número de objetos e conexões, ou muitas vezes dificulta acompanhar a simulação dado a quantidade de eventos gerados por cada módulo.

Segundo, torna-se difícil garantir que o equipamento simulado está obedecendo à modelagem funcional definida nas recomendações da ITU-T, ou seja, de que o equipamento foi modelado de acordo com as normas. Isso exige uma profunda análise de comparação entre os elementos de hardware e suas conexões com os blocos funcionais da (ITU-T, G.798 , 2006). Além disso, o objetivo dessa modelagem é oferecer um plano de transporte OTN para testar o plano de controle GMPLS. Se a OTN modelada seguir as normas e o plano de controle for bem sucedido na simulação, a chance de ser bem sucedido em um equipamento real é maior, desde que este atenda aos padrões da ITU.

Sendo assim, qualquer equipamento OTN pode ser simulado apenas conectando e configurando os blocos funcionais corretamente. Por exemplo, um OXC sem estágio de pré-amplificação do sinal de entrada é modelado como na Figura 5-4, com os mesmos blocos de um OXC com pré-amplificação. Porém, o módulo simples OTSn/OMSn_A_Sk deve ser configurado para desativar o sub-bloco opcional "OA, DAa, PMDC", responsável pela pré-amplificação do sinal (ver Figura 5-3). Assim, não significa que os elementos de hardware não existam na simulação, mas sim que eles estão implementados de maneira implícita nos blocos funcionais da (ITU-T, G.798 , 2006).

Elemento de rede puramente óptico

Um sinal WDM, ao atravessar um ONE que implementa apenas as camadas ópticas da OTN, como um OXC ou ROADM, é conduzido para da interface de entrada para a respectiva interface de saída como um fluxo contínuo, não existindo uma conversão O-E-O do sinal WDM. A Figura 5-5 compara a transmissão de dados que atravessa três nós da rede, quando se trata de nós digitais ou puramente ópticos. Em uma rede com conversão O-E-O, ou em uma rede completamente digital como as redes de computadores, a PDU que transporta os dados é completamente

armazenada antes de ser reenviada por um nó (ND2). No caso de transmissão por nós puramente ópticos, embora haja um tempo para transmitir o sinal WDM, não existe uma *bufferização* do sinal óptico nos nós intermediários (NO2).

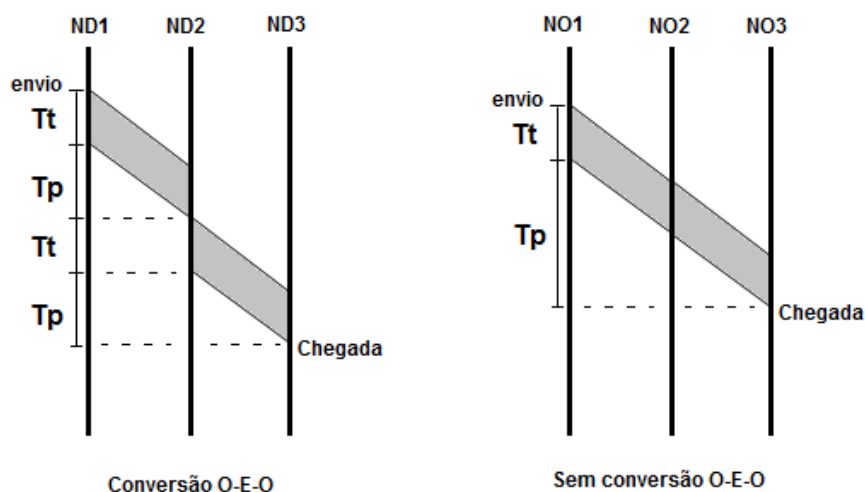


Figura 5-5: tempos de transmissão e propagação com ou sem conversão O-E-O nos nós

No OMNET++ a transmissão sem bufferização é implementada da seguinte maneira: assim que um ONE recebe uma mensagem representando a transmissão de um quadro OTN, ele já começa a transmiti-la pela interface de saída correspondente. O final da retransmissão acontece simultaneamente com a sua chegada completa no nó que está retransmitindo.

5.3.1 Modelagem do canal de serviço

O canal de serviço é modelado conforme proposto na seção 4.4, onde uma interface PPP/Ethernet é responsável pela transmissão das mensagens do plano de controle e gerência da OTN (esta última não foi simulada, pois está fora do escopo). Segundo a recomendação (ITU-T, G.798, 2006), os blocos responsáveis pela modulação e demodulação do canal de serviço são o OTSn_TT_So e o OTSn_TT_Sk, respectivamente. A Figura 5-6 apresenta a ligação entre a interface PPP (bidirecional) e as terminações *sink* e *source* de uma interface OTN bidirecional. Neste caso, o canal de serviço é logicamente bidirecional, embora fisicamente sejam dois comprimentos de onda (iguais ou diferentes) atravessando duas fibras paralelas.

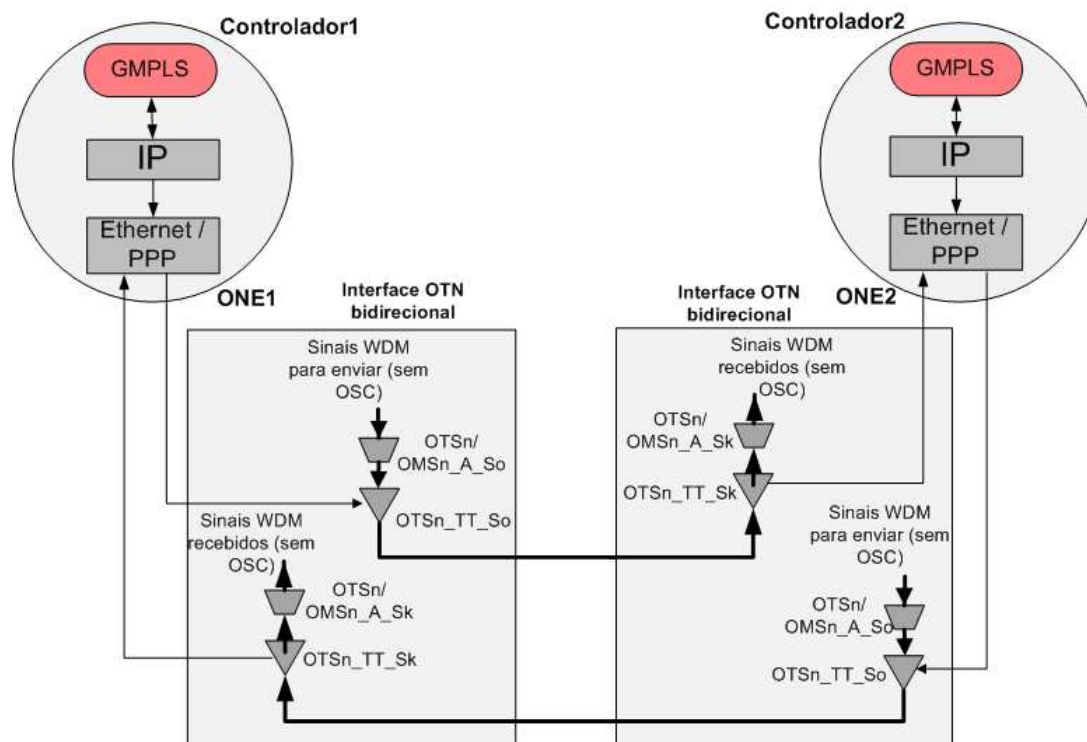


Figura 5-6: Modelo de implementação do canal de controle

O bloco OTSn_TT_So modula os dados do canal de serviço em um comprimento no sub-bloco “Generate OSC” (ITU-T, G.798 , 2006, p. 37). No entanto, o formato específico do OSC, bem como sua implementação, é deixado para estudo futuro pela norma. Teoricamente, a taxa máxima de transmissão da interface PPP é igual à taxa de transmissão do OSC (do sinal WDM). Na recepção do canal (OTSn_TT_Sk), onde o OSC é demodulado, a velocidade de transmissão entre a interface PPP deve ser de pelo menos a velocidade de transmissão do OSC, a fim de garantir que não haja enfileiramento na transferências dos dados entre a interface OTN e a interface PPP. Na simulação realizada, a interface PPP possui a mesma taxa de transmissão que o OSC, que por sua vez é igual à taxa dos outros sinais WDM que transportam a carga útil.

Testes dos módulos do plano de transporte OTN

A rede da Figura 5-7 é usada para testar os módulos dos equipamentos da camada óptica implementados. O amplificador de linha é testado através da verificação do campo *power* da *OTNMsg* antes e depois de passar pelo amplificador que, no exemplo, aumentou de um valor aproximado 9.0 para 11.7mw. Na modelagem não é

aplicado nenhum estudo rigoroso quanto a potência de um sinal óptico ou sobre a queda de potência. Apenas é fornecido um meio para que esses parâmetros sejam representados.

Os OXC's, por sua vez, são testados através da verificação do caminho seguido pela *OTNMsg*, comparando com as ligações da matriz de conexão, implementadas pelo módulo OCH_C e configuradas via arquivo XML. Foi verificado visualmente que as mensagens seguiam pelos caminhos corretos e que o valor do comprimento de onda, indicado pelo campo *wavelength* na *OTNMsg*, era alterado quando as configurações indicavam conversão de comprimento de onda, e inalterado quando não indicavam a conversão.

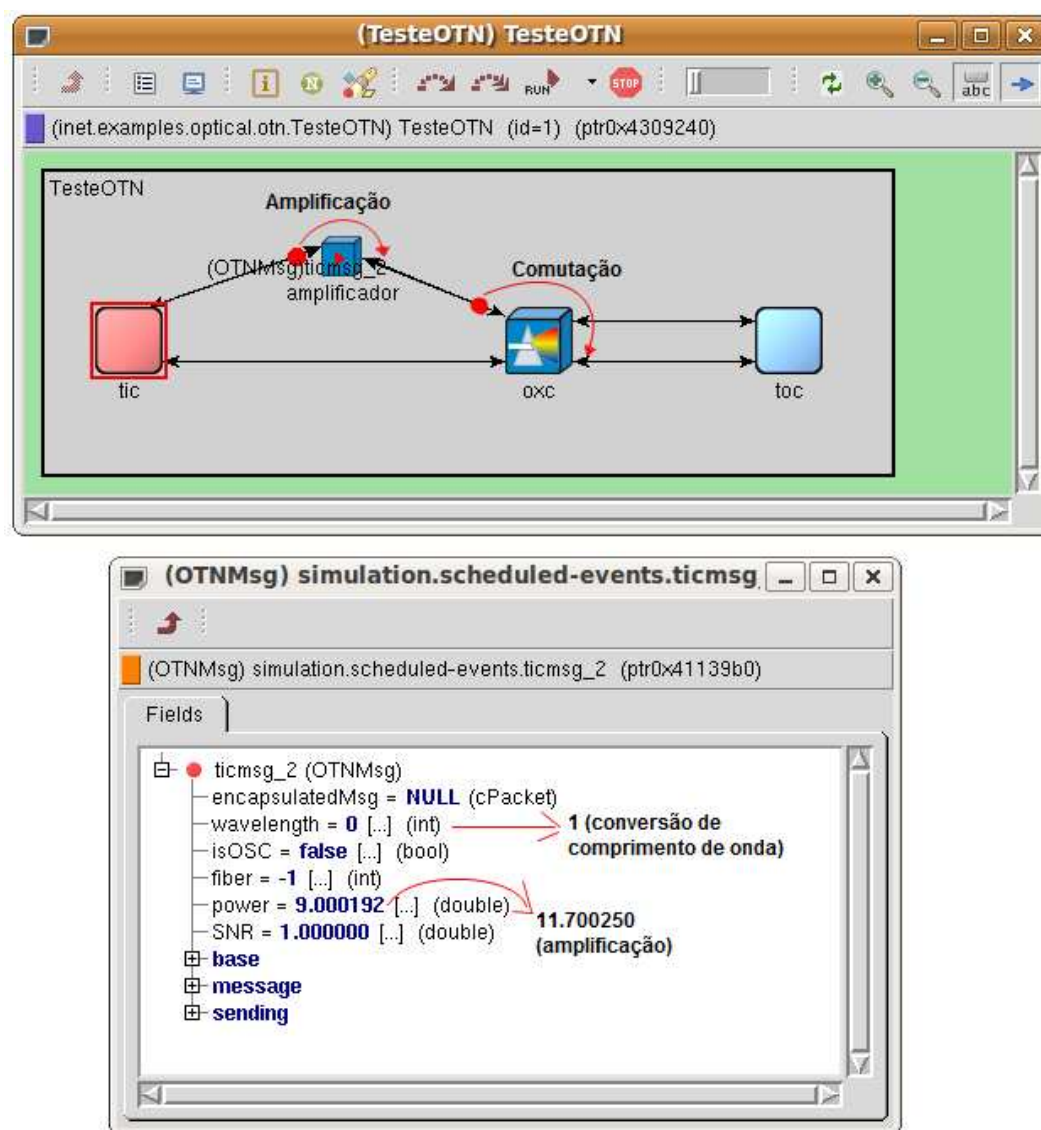


Figura 5-7: Teste realizado dos módulos amplificadores de linha (amplificador) e OXC

5.4 EXTENSÃO DOS MÓDULOS MPLS DO INET

No INET há dois tipos de LSR's: um baseado no LDP (LDP_LSR) e outro no RSVP-TE (RSVP_LSR). O controlador GMPLS para redes OTN baseia-se na extensão dos módulos internos do RSVP_LSR com o RSVP-TE na sinalização, como mostra a Figura 5-8. Os módulos com o nome acrescido do caractere *g* são modificados para sinalizar LSP's em uma rede OTN, que são: (g)rsvp, (g)libTable, (g)ted e (g)linkStateRouting. Suas modificações são explicadas posteriormente. Os outros módulos não precisaram de alterações.

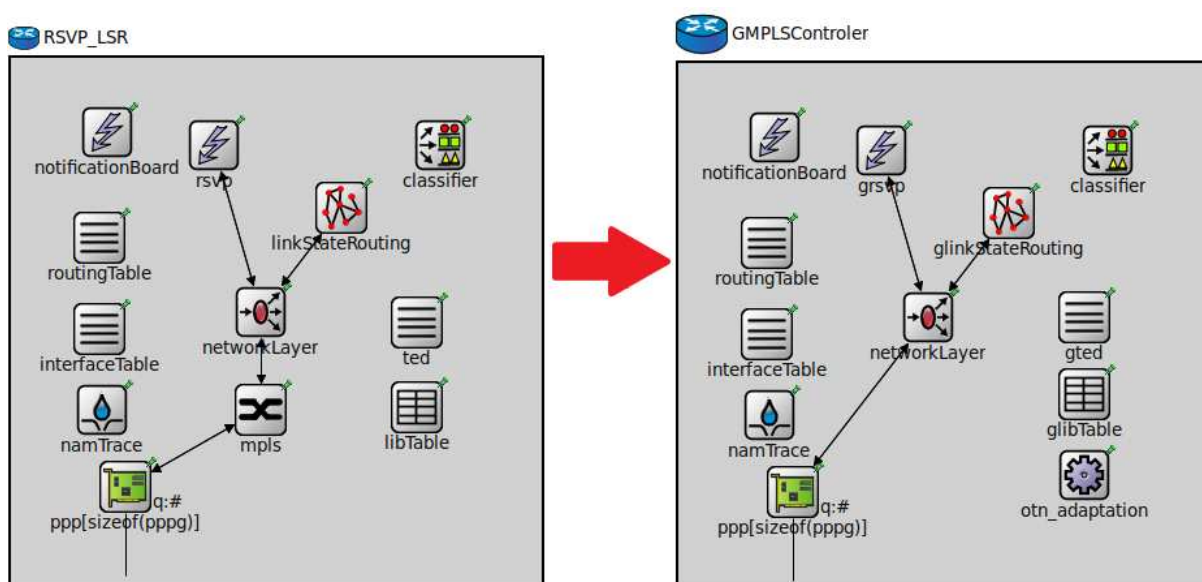


Figura 5-8: MPLS LSR e controlador GMPLS, baseados no RSVP-TE

A primeira alteração aplicada, e talvez uma das mais importantes, é a exclusão do módulo *mpls*. Este módulo, no RSVP_LSR, tem como principal função de comutar um quadro com base em seu rótulo, realizando as operações de troca de rótulo, retirada e empilhamento, descritos na arquitetura MPLS (IETF, RFC3031, 2001). No entanto, essas são operações apenas do plano de transporte. No GMPLS, quando aplicado a tecnologias de transporte (TDM, LSC ou FSC) as operações de comutação ou roteamento são feitas pelo dispositivo controlado, de acordo com a tecnologia a qual ele pertence, já que não existe a inserção de um rótulo no sinal cliente.

Por exemplo, na OTN, um OXC realiza uma operação de comutação de comprimento de onda de acordo com a sua matriz de comutação óptica. Logo,

nenhum rótulo é analisado no sinal WDM, o que não seria possível já que não existe conversão O-E-O. Em ONE's digitais da OTN, a comutação TDM é feita com base na matriz de conexão da camada ODU, e não por rótulos adicionados a um quadro da OTN. Em suma, enquanto no MPLS o rótulo é usado para acelerar o lento processo de roteamento com base no cabeçalho IP, no GMPLS o rótulo é usado apenas para representar um recurso no plano de transporte na tabela de rótulos.

Com a separação do plano de controle do plano de transporte, a interface PPP e, portanto, o controlador, recebe apenas as mensagens do plano de controle, enquanto que o RSVP_LSR recebe mensagens dos protocolos do MPLS (RSVP e protocolo de roteamento), assim como os pacotes IP's rotulados transportando a carga útil (o sinal cliente).

O módulo *gted* inclui os novos parâmetros de tráfego na representação dos TE *links*. Cada módulo *glinkStateProtocol* envia uma mensagem ao controlador vizinho a fim de distribuir as informações dos TE *links* para a construção da TED em cada controlador. Assim que o *glinkStateProtocol* recebe uma mensagem de anúncio de outro controlador, ele atualiza o TED para incluir as novas informações.

Assim, o *glinkStateProtocol* implementa a funcionalidade de descoberta de enlaces, descrita na seção 4.5, pois fornece ao TED as informações sobre todos os nós e os TE *links* existentes na rede. Para descobrir os parâmetros dos TE *links*, o *gted* utiliza o módulo *otn_adaptation* (único módulo completamente novo no controlador) para obter informações sobre a interface OTN associada a cada um de seus TE *link* locais, como descrito na seção 4.5, no processo proposto de correlação de propriedades dos enlaces.

Com isso, os campos do parâmetro ISC (IETF, RFC4203, 2005) são preenchidos como, por exemplo, o *Max LSP Bandwidth* (igual a soma da largura de banda de todos os comprimentos de onda) e o *Minimum LSP Bandwidth* (largura de banda mínima de um LSP, igual a menor largura possível de um comprimento de onda na interface OTN).

O *grsvp* (extensão do RSVP-TE para o GMPLS) implementa os seguintes processos:

- Os processos e as mensagens da seção 4.6 (apêndices A e B).
- O processo de verificação do canal de controle da gerência de enlaces, através do envio de mensagens de HELLO (seção 4.5).

Os LSP's estabelecidos são fornecidos por um arquivo de configuração em XML utilizado pelo *grsvp*, que diz para um LER de ingresso qual o tipo de LSP (OCh1, OCh2 ou OCh3 LSP), quais os nós do caminho e quais rótulos (OCh_LC's, ou comprimentos de onda) devem ser alocados em cada salto. Dessa forma, o módulo *glinkStateRouting* não realiza o cálculo de rotas, mas apenas distribui informação de roteamento, já que não faz parte do escopo do presente trabalho implementar algoritmos de RWA.

O módulo *otn_adaptation* é a interface entre o controlador e o ONE do plano de transporte (na simulação, um OXC). Ele também é utilizado pelo RSVP para configurar uma conexão na matriz de conexão da função OCH_C. Sempre que uma entrada do tipo {porta de entrada, rótulo de entrada / porta de saída, rótulo de saída} é inserida na tabela de rótulos (*glibTable*) pelo *grsvp*, o OXC é configurado pelo *otn_adaptation*.

Os módulos *InterfaceTable*, *RoutingTable*, *NetworkLayer* e PPP implementam a DCN, e não precisaram ser alterados. O módulo *classifier* é responsável por associar uma FEC a um pacote IP não classificado ao entrar no LSR. Embora não tenha sido utilizado na simulação, é deixado no *GMPLSControler* para modelos futuros onde o LER possua uma interface ligada diretamente a uma rede IP. O módulo *notificationBoard* é um meio de entrar com eventos específicos para os módulos através de um arquivo XML, ou para que os módulos anunciem alguma mudança de estado para todos módulos inscritos no *notificationBoard*. O módulo *namtrace* serve para gerar um *log* de acordo com as notificações enviadas ao *NotificationBoard*. Os módulos *classifier*, *notificationBoard* e *namtrace* também não precisaram ser alterados.

5.5 RESULTADOS OBTIDOS

A Figura 5-9 representa a rede simulada para testar o plano de controle proposto para o estabelecimento dos OCh LSP's. Esse LSP cria um túnel entre nós *host1* e *host2* através da alocação de um caminho óptico entre eles. Esses nós geram um sinal WDM (uma OTNMsg) constantemente, que é bloqueado pelos LSR's diretamente conectados até que o OCh LSP seja estabelecido. Cada LSR é formado por um controlador GMPLS associado a um OXC. Os endereços IP's terminados em um são os *routerId's* (endereço IP do GMPLSController na DCN), e os terminados em um ou dois são os identificadores locais de uma adjacência do plano de controle, como também de um TE *link* (seção 4.4.1). As interfaces OTN de cada OXC são do tipo OTM-2.10 (dez comprimentos de onda de 10 Gbps).

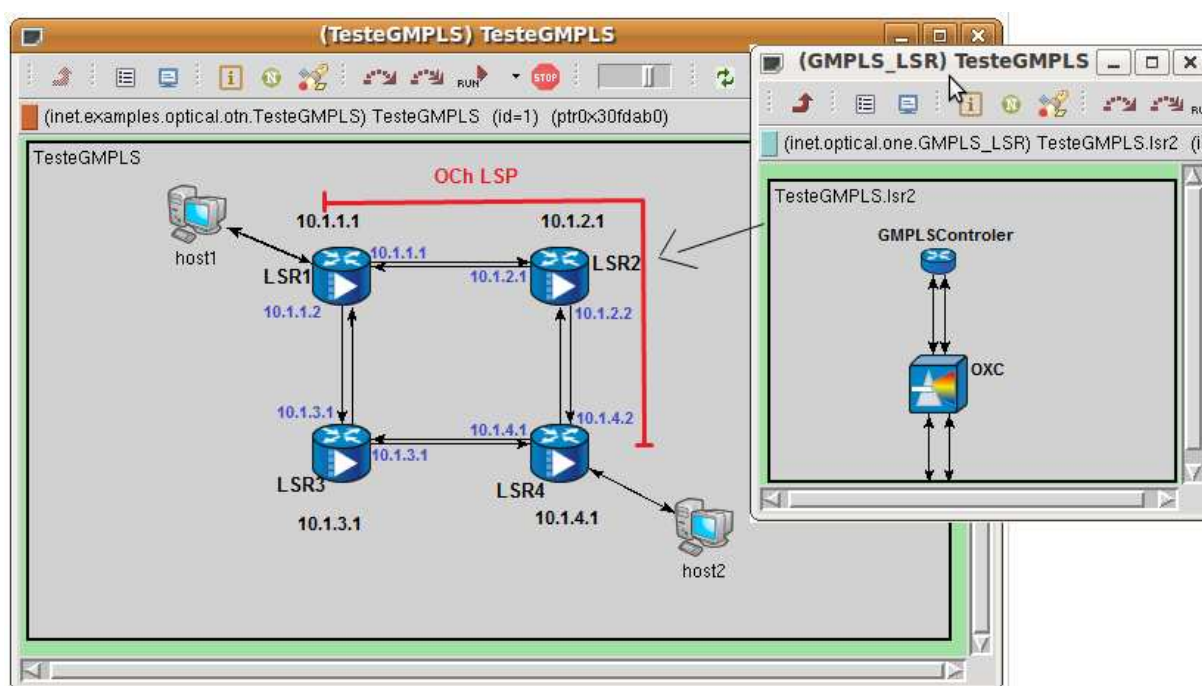


Figura 5-9: Exemplo de alocação de um OCh LSP no OMNET++

A sinalização do OCh LSP só ocorre após 1) a inicialização da DCN, 2) a inicialização do TED, com todos os TE *links* da rede e 3) quando o módulo *grsvp*, dentro do controlador, descobrir quem são os seus vizinhos (as adjacências de controle). A adjacência de controle entre o LSR1 e o LSR2 só está disponível quando o processo de HELLO (seção 4.5, gerência do canal de controle) entre os LSR's indicar que existe um canal de comunicação entre os controladores.

A Figura 5-10 apresenta as entradas dos TED's em cada LSR com quatro de seus parâmetros. Inicialmente, cada TED contém apenas os TE *links* diretamente conectados ao LSR, porém, o protocolo de roteamento distribui essas informações de forma que os TED's possuam entradas de todos os TE *links* do domínio (ou seja, as 8 entradas abaixo).

Cada TE *link* é unidirecional no sentido do roteador que o anuncia (*advRouter*) para o nó do outro lado do TE *link* (*linkId*). Por exemplo, na primeira entrada da Figura 5-10 o LSR1, de endereço IP "10.1.1.1", anuncia que há um TE *link* entre ele e o LSR2, de endereço IP "10.1.2.1". O máximo de largura de banda que pode ser alocada entre os dois nós (*maxBandwidth*) é de 100 Gbps, que representa a soma da largura de banda dos dez canais de 10 Gbps. Além disso, o mínimo possível de largura de banda de um LSP (*minResvBandwidth*) é de 10 Gbps, já que a unidade mínima de alocação é um OCh_LC (comprimento de onda).

```

Formato: advRouter --> linkId, maxBandwidth, minResvBandwidth

Entradas do TED após inicialização do módulo TesteGMPLS.lsr1.gmpls.gted
 10.1.1.1 --> 10.1.2.1, maxBandwidth=1e+11, minResvBandwidth=1e+10
 10.1.1.1 --> 10.1.3.1, maxBandwidth=1e+11, minResvBandwidth=1e+10
Entradas do TED após inicialização do módulo TesteGMPLS.lsr2.gmpls.gted
 10.1.2.1 --> 10.1.1.1, maxBandwidth=1e+11, minResvBandwidth=1e+10
 10.1.2.1 --> 10.1.4.1, maxBandwidth=1e+11, minResvBandwidth=1e+10
Entradas do TED após inicialização do módulo TesteGMPLS.lsr3.gmpls.gted
 10.1.3.1 --> 10.1.4.1, maxBandwidth=1e+11, minResvBandwidth=1e+10
 10.1.3.1 --> 10.1.1.1, maxBandwidth=1e+11, minResvBandwidth=1e+10
Entradas do TED após inicialização do módulo TesteGMPLS.lsr4.gmpls.gted
 10.1.4.1 --> 10.1.3.1, maxBandwidth=1e+11, minResvBandwidth=1e+10
 10.1.4.1 --> 10.1.2.1, maxBandwidth=1e+11, minResvBandwidth=1e+10

```

Figura 5-10: TED de cada LSR

A Figura 5-11 apresenta alguns trechos do arquivo de *log* gerado pela sinalização durante o estabelecimento do OCh LSP da Figura 5-9. Cada entrada do *log* inicia com o caminho completo do objeto que gerou a entrada e do instante em que ocorreu o evento. Por exemplo: o campo "TesteGMPLS.lsr1.gmpls.grsvp" indica que o objeto *grsvp* que pertence ao controlador *gmpls* no LSR1 da rede simulada *TesteGMPLS* é quem gerou aquele evento. Esses eventos podem ser o envio ou recebimento de uma mensagem do RSVP, ou então alguma operação realizada em decorrência do recebimento dessas mensagens.

```

//LOG GERADO NO ESTABELECIMENTO DE UM OCh LSP

TesteGMPLS.lsr1.gmpls.grsvp, 1: enviando mensagem de PATH de
10.1.1.1 para 10.1.2.1
    lspId=100, TE link (porta local)=10.1.1.1, link componente
(rótulo) downstream=1 e upstream=2
...
TesteGMPLS.lsr4.gmpls.grsvp, 1.2000001912: recebimento e
processamento de mensagem de PATH referente a lspId=100

TesteGMPLS.lsr4.gmpls.grsvp, 1.2000001912: instalando rótulo (na
gLibTable) para a lspId=100
    formato (inInterface, inLabel, outInterface, outLabel)
downstream: (ppp1,1,lo0,1)
tempo de configuração do OXC: 2
upstream: (lo0,2,ppp1,2)
tempo de configuração do OXC: 2

TesteGMPLS.lsr4.gmpls.grsvp, 3.2000001912: enviando mensagem de
RESV de 10.1.4.1 para 10.1.2.1
    lspId=100, TE link (porta remota)=10.1.2.2, link componente
(rótulo)=1
...
TesteGMPLS.lsr4.oxc.OCH_C, 3.7: comutação do sinal optico
(host2MSG) - mapeamento porta/lambda: (2/2)->(1/2)
...
TesteGMPLS.lsr1.gmpls.grsvp, 4.9000002448: instalando rótulo (na
gLibTable) para a lspId=100
    formato (inInterface, inLabel, outInterface, outLabel)
downstream: (lo0,1,ppp0,1)
tempo de configuração do OXC: 1
upstream: (ppp0,2,lo0,1)
tempo de configuração do OXC: 1
...
TesteGMPLS.lsr1.oxc.OCH_C, 6.2: comutação do sinal optico
(host1MSG) - mapeamento porta/lambda: (2/1)->(0/1)

```

Figura 5-11: partes do arquivo de *log* no estabelecimento de um OCh LSP

Inicialmente, o módulo *grsvp* do LSR1 gera a mensagem de PATH de acordo com as informações fornecidas por um arquivo XML, que indicam o estabelecimento de um OCh2 LSP (10 Gbps) bidirecional, de identificador número 100, pelos nós LSR1, LSR2 e LSR3, utilizando o comprimento de onda 1 no sentido *downstream* e o comprimento de onda 2 no sentido *upstream*. O TE *link* utilizado entre os o LSR1 e o LSR2 é relativo à porta local de identificador “10.1.1.1”. Os rótulos utilizados no sentido de *downstream* e *upstream* são os dos objetos *Label_set* e *Upstream_label*, respectivamente. Os rótulos utilizados entre os outros nós são indicados nos *Label ERO Subobjects*, presentes no ERO (seção 3.5.4, em “Controle aprimorado de rótulos”).

Ao chegar ao LER de egresso (LSR4), a mensagem de RESV só é enviada no sentido contrário após a configuração da entrada do OXC. No exemplo, a entrada na tabela de rótulos é feita no instante $t=1.2000001912$, mas o OXC só está completamente configurado após 2 segundos, em $t=3.2000001912$. Esse tempo de configuração é um parâmetro do modelo do OXC, e pode ser alterado para cada simulação. No exemplo, cada OXC tem um tempo de configuração diferente. Depois desse tempo a mensagem de RESV é enviada para o LSR de *upstream* (LSR2) para que este possa realizar o mesmo processo de alocação de rótulo e configuração do OXC.

Por ser um LSP bidirecional, é necessário alocar duas entradas na tabela de rótulos, um para o sentido *downstream* e outro para o sentido *upstream*. A partir do instante que o LSR4 já configurou o OXC, o sinal óptico proveniente do *host2* atravessa o LSR 4 (pelo comprimento de onda 2) em sentido ao LSR2, onde é bloqueado, até que ele também seja configurado. O mesmo vale para o *host1*: o sinal óptico transmitido só deixará de ser bloqueado pelo LSR1 quando este configurar o seu OXC.

O fim de toda a configuração se dá no instante $t=4.9000002448$ (tempo instalação do rótulo na tabela de rótulos do ingresso, acrescido do tempo de 1 segundo para a configuração do OXC). A partir desse instante, o caminho óptico está estabelecido e os nós *host1* e *host2* passam a trocar mensagens pelo OCh LSP estabelecido.

Os principais resultados da simulação são apresentados na Tabela 3. A modelagem baseada no uso de um controlador por ONE, o uso do endereçamento IP nos TE *links*, o uso do OSC como canal de controle e a agrupamento de enlaces são demonstrados através da simulação, onde todos esses processos são implementados através de extensões nos módulos do INET e pela criação do módulo OTN_Adaptation. A simulação valida também a simplificação proposta dos processos de gerência de enlaces (do LMP), já que foi possível implementar os seus processos sem a necessidade de troca de mensagens entre entidades do LMP, mas sim aproveitando mecanismos de outros protocolos (como o processo de HELLO do RSVP-TE) e utilizando processos que tomam como base algumas premissas de implementação (como o tipo de agrupamento de enlaces, o endereçamento IP dos TE *links* e o fato de haver um canal de controle para cada TE *link*).

Tabela 3: Principais resultados obtidos com a simulação do plano de controle GMPLS para redes OTN

Proposta	Módulo(s) do OMNET++ que implementa(m)	Verificação e resultados obtidos
Processo para a gerência do canal de controle	<i>grsvp</i>	É verificado que os OCh LSP's só começam a ser estabelecidos após o <i>grsvp</i> concluir o processo de HELLO, como foi especificado na seção 4.5
Processos de descoberta de enlaces e de correlação de propriedades dos enlaces	<i>glinkStateRouting, gted, OTN_Adaptation</i>	A simulação demonstra que, como proposto, estes processos podem ser realizados de forma simples, sem a necessidade da troca de mensagens do LMP.
Endereçamento e controladores	Toda a simulação, em geral	Na simulação, o uso de um controlador por OXC, o uso do endereçamento IP para os TE <i>links</i> e a associação de um-para-um entre TE link e adjacência de controle simplificou muitos processos, especialmente os relacionados com a descoberta de recursos.
Sinalização Generalizada	<i>Grsvp, glibTable</i>	A simulação mostra a validade das extensões adotadas dos objetos descritos nas (IETF, RFC3473, 2003) e (IETF, RFC4328, 2006). O uso dos objetos <i>Label_Set</i> , <i>Upstream_Label</i> e <i>Label ERO subobject</i> demonstram como esses objetos podem ser usados para aplicação de métodos de engenharia de tráfego e fornecem um mecanismo para que futuras implementações com RWA sejam incluídas na simulação.
DCN e implementação do canal de controle	<i>networkLayer, routingTable, interfaceTable, OTSn_TT_So/Sk</i>	Sem alterações nos módulos IP, apenas ajustes nas terminações da camada OTS para (de)modular o OSC, a simulação mostra que o IP é uma alternativa viável e simples de implementação do canal de serviço das redes OTN.

5.6 CONCLUSÃO

Uma das principais contribuições da simulação está na quantidade de módulos novos que foram gerados para o OMNET++. Grande parte dos elementos arquiteturais das redes OTN foi modelada, embora ainda falte implementar as camadas digitais OPU, ODU e OTU. Um canal óptico totalmente novo foi implementado no simulador, o qual pode ser utilizado em diferentes tipos de modelagens de redes ópticas. Nesse canal está modelado o atraso, a queda de potência, a degradação da relação sinal ruído e a velocidade de transmissão por comprimento de onda, porém sem o realismo em relação às equações que determinam seus valores. Embora as modelagens e testes da proposta não tenham usado a priori essas características, uma simulação de rede óptica que dependa desses parâmetros pode ser realizada com pequenos ajustes nas equações embutidas no código e pela adição de novos parâmetros. Assim, tanto o canal óptico, como os módulos para redes OTN, podem ser utilizados para simulações de redes ópticas além do teste do plano de controle aqui proposto.

A simulação do plano de controle demonstra a validade da escolha dos processos adotados do GMPLS para o estabelecimento dos LSP's na hierarquia óptica da OTN. Isso é demonstrado, primeiramente, através da modelagem no simulador dos controladores e dos equipamentos OTN (os OXC's), seguido da modificação dos módulos do INET relacionados ao MPLS com as extensões propostas de sinalização e roteamento, o que inclui um novo modelo para a tabela de rotas e para o TED. O sucesso no estabelecimento dos LSP's na simulação demonstram que o conjunto de mensagens e processos adotados são suficientemente capazes de alocar recursos na rede OTN para o estabelecimento de um OCh LSP.

Além disso, na modelagem desenvolvida para redes OTN foi implementando de fato a recomendação (ITU-T, G.798 , 2006), bem como a análise da relação entre o equipamento real e a modelagem da (ITU-T, G.805, 2000). Isso reforça o fato de que a proposta é aplicável a qualquer equipamento de rede OTN, desde que esteja de acordo com padrões da ITU para OTN.

6 CONCLUSÃO

Ao longo das pesquisas realizadas no desenvolvimento da proposta, constatou-se que existe um longo caminho entre entender uma tecnologia e utilizá-la para resolver um problema. Embora os órgãos de padronização, como a ITU e IETF, ofereçam uma boa base teórica com especificações de arquiteturas e protocolos, o caminho percorrido ao longo do trabalho mostrou que muitas questões surgem na hora de aplicar esses padrões na solução de um problema. Mais do que isso, esta dissertação mostra também que para unir soluções de órgãos diferentes é necessário um esforço extra para analisar e relacionar os diferentes padrões.

O objetivo principal do trabalho, a proposta de um plano de controle GMPLS para redes OTN, foi alcançada com sucesso. A proposta, descrita no capítulo 4 conseguiu cumprir seu objetivo final: estabelecer LSP's pela hierarquia óptica da OTN. Para isso, foi levantada uma base teórica sobre as redes OTN e o mapeamento dos equipamentos de acordo com a modelagem funcional da (ITU-T, G.805, 2000), tornando a solução proposta aplicável a qualquer equipamento que esteja de acordo com as normas do ITU.

No relacionamento entre as recomendações, o ponto chave se deu na representação dos recursos do plano de transporte pelo plano de controle GMPLS. Uma vez que os TE *links* e os *links* componentes são identificados dentro da rede OTN, o framework GMPLS consegue estabelecer caminhos ópticos através dos protocolos de sinalização e roteamento provenientes do mundo IP. Verificou-se que, embora os diferentes órgãos de padronização utilizem uma linguagem diferente de representação, após uma análise muitos desses termos possuem uma equivalência funcional, como, por exemplo, o caso em que uma trilha OCh da rede OTN é um LSP com comutação de comprimentos de onda para o plano de controle. Esta análise de terminologia pode ser útil até mesmo em implementações futuras de um sistema de gerência, que pode obter e relacionar as informações tanto da rede OTN quanto do plano de controle GMPLS.

Como o custo para se implantar a proposta em uma rede real é muito alto, foi utilizado um modelo de simulação baseado no OMNET++, tanto da rede OTN

quanto do plano de controle GMPLS, implementando todos os processos adotados na proposta. A simulação mostra que a forma como foram utilizados os controladores, o endereçamento dos TE *links* e dos *link* componentes, as adaptações nos processos da gerência de enlaces, a forma de distribuição da informação de roteamento e os processos e objetos escolhidos do RSVP-TE para a sinalização são suficientes para o estabelecimento dos OCh LSP's.

Durante as pesquisas de trabalhos relacionados verificou-se que nenhum dos autores estudados considerou a rede OTN como é descrita pelas recomendações da ITU. Embora muitos deles tenham validado suas propostas via simulação, ou pela criação de uma rede de teste, suas soluções correm o risco de não serem genéricas o suficiente para qualquer equipamento OTN.

De maneira geral, além de cumprir com os objetivos planejados, a dissertação deixa um novo caminho para trabalhos futuros, pois apresenta metodologias de modelagem e implementação que podem ser facilmente reutilizadas para realizar os melhoramentos propostos nos trabalhos futuros.

6.1 RESULTADOS DA DISSERTAÇÃO

Tomando-se como base as atividades de pesquisa realizadas durante os últimos dois anos de trabalho, pode-se considerar como os principais resultados desta dissertação:

- Relacionamento entre as recomendações do IETF relativas ao GMPLS e as recomendações da ITU relativas à OTN. Isso inclui uma comparação entre termos usados por ambas as organizações que podem ser utilizados em outros processos, como, por exemplo, na gerência de redes OTN;
- Uma proposta de uso do framework GMPLS para o estabelecimento de caminhos ópticos (OCh LSP's) pela rede OTN;
- Publicação do artigo “**Plano de Controle GMPLS para Redes Ópticas de Transporte**” no XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT 2009), que será sediado na cidade de Blumenau/SC no período de 29 de setembro a 2 de outubro de 2009;

- Desenvolvimento de uma biblioteca de simulação para redes OTN no OMNET++;
- Extensão da biblioteca INET do MPLS, agora com um plano de controle GMPLS capaz de estabelecer caminhos ópticos por uma rede OTN.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Alguns trabalhos futuros são sugeridos a fim de abranger tudo aquilo que ficou fora do escopo desta dissertação, dado a extensão em complexidade tanto das redes OTN quanto em relação ao plano de controle GMPLS:

- Aperfeiçoar o modelo de simulação da OTN no OMNET++. Isso inclui: 1) implementar os blocos funcionais restantes de terminação de trilha e adaptação das camadas OCh, OTU e ODU (ou seja, implementar também a hierarquia digital da OTN); 2) Incluir a parte de correlação de defeitos e alarmes nos blocos funcionais; 3) com os novos blocos criar outros equipamentos OTN, inclusive da parte digital, como *transponders*, regeneradores 3R e terminações digitais;
- Avaliar quais sinais da correlação de alarmes descritos na (ITU-T, G.798 , 2006) podem ser utilizados para verificar o estado de um TE *link* como também o estado do canal de serviço. Incluir no módulo OTN_Adaptation o acesso direto à essas informações.
- Aperfeiçoar a simulação do GMPLS no estabelecimento das OCh LSP's. Isso inclui melhorar a parte de erros da sinalização. Na simulação realizada, quando uma LSP não pode ser estabelecida, apenas erros simples são retornados. Pela (IETF, RFC3473, 2003), informações adicionais a mensagem de erro pode ser retornada. Por exemplo, caso nenhum dos rótulos do *Label_SET Object* puderem ser utilizados, o LSR de *downstream* pode (embora não seja obrigatório) uma sugestão de rótulos para o LSR de *upstream*;
- Implementar algoritmos de RWA. As informações necessárias para o cálculo com base em restrições já são distribuídas, basta implementar funções que calculem caminhos completos (nós e comprimentos de onda) no módulo *gtd*.

- Aperfeiçoar a proposta para que inclua o estabelecimento de ODU LSP's, ou seja, a alocação de recursos na hierarquia digital da OTN. Com isso, implementar o uso dos H-LSP's para estabelecer ODU LSP's por um núcleo totalmente óptico (seção 3.5.5). Para a validação por meio de simulação dessa nova proposta é necessário que as camadas digitais sejam implementadas no OMNET++;
- Uma proposta de uso dos métodos engenharia de tráfego do GMPLS para as redes OTN. Neste item inclui, além do uso dos algoritmos de RWA, o estudo dos mecanismos de proteção e restauração. No GMPLS os mecanismos de proteção do plano de transporte são representados por meio de TE *links*. Por exemplo, um enlace do plano de transporte com proteção 1+1 é representado por um único TE *link* no TED. Já um enlace 1:1, onde o enlace de proteção é utilizado para tráfego extra, é representado por dois TE *links* diferentes. Para isso, deve-se estender o processo de descoberta de enlaces, bem como o módulo OTN_Adaptation para informar ao plano de transporte quando um TE *link* fica não operacional e se houve a comutação para o enlace de proteção (na proteção a comutação é feita apenas pelo plano de transporte, o GMPLS apenas “assiste”). Esses mecanismos começaram a ser estudados durante o desenvolvimento do presente trabalho, mas ficaram fora do escopo por estarem relacionados com a engenharia de tráfego. Além disso, muitas outras análises precisam ser feitas nesse sentido.
- Análise de processos de restauração do plano de controle no caso de falhas de controladores ou do canal de controle.

7 BIBLIOGRAFIA

Binh, L. N., Binh, L. H., & Tu, V. T. (2009). Routing and Wavelength Assignment and Survivability of Optical Channels in Ultra-high Speed IP over DWDM Networks Under Constraints of Residual Dispersion and Nonlinear Effects. *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)* , 12.

C. Santos, G., D. Santos, F., & C. R. F. Oliveira, J. (02 de setembro de 2008). Aprovisionamento Automático de Circuitos Ópticos via Plano de Controle GMPLS aplicado a uma Rede Óptica Reconfigurável Baseada em ROADMs. *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBRT)* , p. 4.

Cieutat, L., & Binh, L. (2003). *Routing and Wavelength Assignment in GMPLS-based DWDM Optical Networks: An OMNeT++ modelling Platform*. Melbourne: MONASH UNIVERSITY.

E. F. (s.d.). *Eclipse.org home*. Acesso em 06 de agosto de 2009, disponível em site principal da IDE Eclipse.

ECI Telecom. (Julho de 2008). White Paper. *Next Generation OTN* .

Farrel, A., & Bryskin, I. (2006). *GMPLS: Architecture and Applications*. San Francisco: Elsevier.

IETF. (setembro de 1997). RFC2205. *Resource ReSerVation Protocol (RSVP) -- Version 1 Functional Specification* .

IETF. (abril de 2001). RFC2961. *RSVP Refresh Overhead Reduction Extensions* .

IETF. (janeiro de 2001). RFC3031. *Multiprotocol Label Switching Architecture* .

IETF. (dezembro de 2001). RFC3209. *RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels* .

IETF. (janeiro de 2002). RFC3212. *Constraint-Based LSP Setup using LDP* .

- IETF. (fevereiro de 2003). RFC3468. *The Multiprotocol Label Switching (MPLS) Working Group decision on MPLS signaling protocols* .
- IETF. (janeiro de 2003). RFC3471. *Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Functional Description* .
- IETF. (janeiro de 2003). RFC3473. *Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Resource ReserVation Protocol-Traffic Engineering (RSVP-TE) Extensions* .
- IETF. (outubro de 2004). RFC3945. *Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture* .
- IETF. (outubro de 2005). RFC4201. *Link Bundling in MPLS Traffic Engineering (TE)* .
- IETF. (outubro de 2005). RFC4203. *OSPF Extensions in Support of Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS)* .
- IETF. (outubro de 2005). RFC4204. *Link Management Protocol (LMP)* .
- IETF. (janeiro de 2006). RFC4328. *Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Extensions for G.709 Optical Transport Networks Control* .
- IETF. (outubro de 2008). RFC5307. *IS-IS Extensions in Support of Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS)* .
- Ilyas, M., & Mouftah, H. T. (2003). *The Handbook of Optical Communication Networks*. Boca Raton: CRS Press.
- ITU-T, T. S. (Março de 2003). G.709. *Interfaces for the Optical Transport Network (OTN)* .
- ITU-T, T. S. (Dezembro de 2006). G.798 . *Characteristics of optical transport network hierarchy equipment functional blocks* .
- ITU-T, T. S. (2000, março). G.805. *Generic functional architecture of transport networks* .

ITU-T, T. S. (2006, Junho). G.8080. *Architecture for the Automatically Switched Optical Network (ASON)* .

ITU-T, T. S. (2001, Novembro). G.872. *Architecture of Optical Transport Networks* .

Janota, V. (28 de julho de 2005). Traffic engineering in modern switched networks. Praga, República Tcheca.

Jeruchim, M. C., Balaban, P., & Shanmugan, K. S. (2002). *Simulation of Communication Systems: Modeling, Methodology and Techniques*. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers.

Kartalopoulos, S. V. (2008). *Next Generation Intelligent Optical Networks*. Tulsa: Springer.

L. Beeg, W. L. (2006). *Survey of Simulators of Next Generation Networks for Studying Service Availability and Resilience*. Nova Zelândia: University of Canterbury.

Maier, M. (2008). *Optical Switching networks*. Cambridge: Cambridge University Press.

Perez, J. (2005). *MQTT Performance Analysis with OMNeT++*. Institut Eurécom, Zurich: IBM Zurich Research Laboratory.

Perros, H. G. (2005). *Connection-oriented networks*. John Wiley & Sons Ltd,.

Ramaswami, R., & Sivarajan, K. N. (2002). *Optical Networks - A Pratical Perspective*. San Francisco: Morgan Kaufmann.

Varga, A. (s.d.). *Omnet++ main page*. Acesso em 06 de agosto de 2009, disponível em Site do Simulador de Eventos Discretos Omnet++: <http://www.omnetpp.org/>

Varga, A. (s.d.). *OMNET++ models*. Acesso em 07 de agosto de 2009, disponível em Site do Simulador de Eventos Discretos Omnet++: <http://www.omnetpp.org/models>

Varga, A., & Acadêmica, C. (s.d.). *INET Framework main page*. Acesso em 06 de agosto de 2009, disponível em Site oficial do INET.

White, I. M., Rogge, M. S., Shrikhande, K., & Kazovsky, L. G. (2003). A Summary of the HORNET Project: A Next-Generation Metropolitan Area Network. *IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS* , 17.

White, I., Rogge, M., Shrikhande, K., & Kazovsky, L. (novembro de 2003). A summary of the HORNET project: a next-generation metropolitan area network. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*.

Yoon, H., & Kim, K. (17 de fevereiro de 2008). Dynamic Connection Control Scheme Considering Network Topology in an Optical Network. *International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)* , p. 4.

Zhang, N., & Bao, H. (30 de maio de 2009). GMPLS Technology and Its Application in WDM Optical Network. *International Conference on Networking and Digital Society* , p. 4.

Apêndice A - MENSAGENS DE SINALIZAÇÃO

Neste apêndice são apresentadas as mensagens de sinalização PATH e RESV e os objetos e sub-objetos utilizados, com base na (IETF, RFC3473, 2003). Alguns desses objetos são opcionais e, portanto, dependem dos processos adotados.

Mensagem de PATH

```
<Path Message> ::= <Common Header>
    <SESSION> <RSVP_HOP>
    <EXPLICIT_ROUTE>
    <LABEL_REQUEST>
    <LABEL_SET>
    <sender descriptor>
```

```
<sender descriptor> ::= <SENDER_TEMPLATE> <SENDER_TSPEC>
    <SUGGESTED_LABEL>
    <UPSTREAM_LABEL>
```

```
<EXPLICIT_ROUTE> ::= <IPv4 Prefix>
    <downstream Label ERO sub-object>
    <upstream Label ERO sub-object>
```

Mensagem de RESV

```
<Resv Message> ::= <Common Header>
```

<SESSION> <RSVP_HOP>

<flow descriptor>

<FF flow descriptor> ::= <FLOWSPEC> <FILTER_SPEC>

<LABEL> <RECORD_ROUTE>

Parâmetros dos objetos utilizados

Parâmetros dos objetos utilizados nas mensagens de PATH e RESV do RSVP-TE

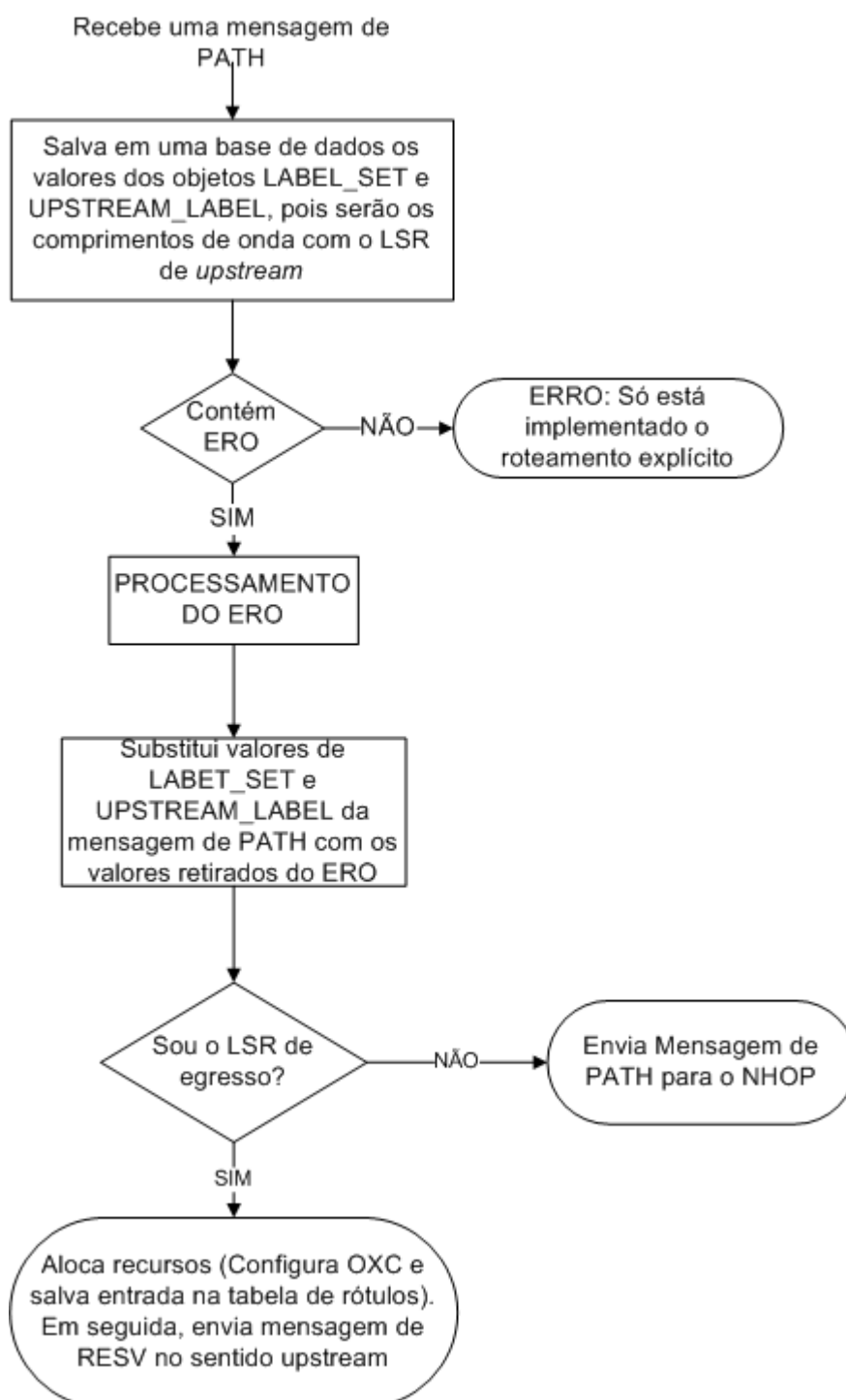
Objeto	Recomendação	Parâmetro
(Generalized) LABEL	(IETF, RFC3473, 2003) (IETF, RFC4328, 2006)	LABEL (um número de 32 bits, que representa um OCH_LC)
SESSION	(IETF, RFC3209, 2001)	IPv4 <i>tunnel end Point Address</i>
		<i>Tunnel ID</i>
RSVP_HOP	(IETF, RFC2205, 1997)	IPv4 <i>Next/Previous Hop Address</i>
		<i>Logical Interface Handle</i>
ERO IPv4 Prefix	(IETF, RFC3209, 2001)	IPv4 Address
		L bit (<i>1 para loose hop e 0 para strict hop</i>)
Label ERO sub-object	(IETF, RFC3473, 2003)	Idem <i>Generalized LABEL</i>
(Generalized) LABEL_REQUEST	Formato: (IETF, RFC3473, 2003), valores estendidos da: (IETF, RFC4328, 2006)	<i>LSP Encoding Type</i>
		<i>Switching Type</i>
		G-PID
LABEL_SET	(IETF, RFC3473, 2003)	*SubChannel 1...Subchannel N
SENDER_TEMPLATE	(IETF, RFC3209, 2001)	IPv4 <i>tunnel sender address</i>
		LSP ID
SENDER_TSPEC	(IETF, RFC4328, 2006)	NMC
		NVC

		Multiplier (MT)
SUGGESTED_LABEL	(IETF, RFC3473, 2003)	Idem Generalized LABEL
UPSTREAM_LABEL	(IETF, RFC3473, 2003)	Idem Generalized LABEL
FLOWSPEC	(IETF, RFC4328, 2006)	Idem SENDER_TSPEC
FILTER_SPEC	(IETF, RFC3209, 2001)	Idem SENDER_TEMPLATE
RECORD_ROUTE	(IETF, RFC3473, 2003)	Idem EXPLICIT_ROUTE

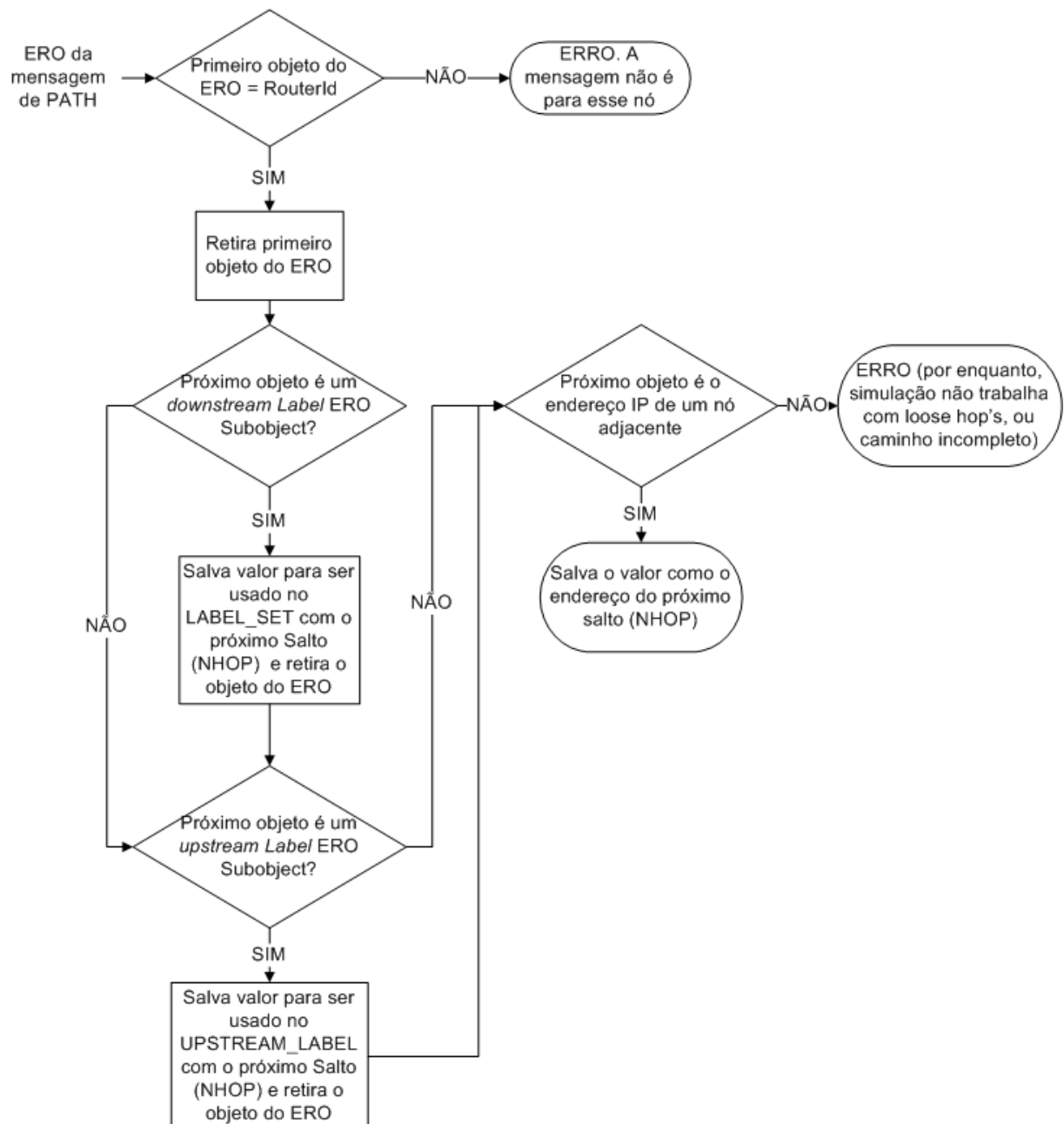
*O formato de um *SubChannel* é o mesmo de um rótulo generalizado.

Apêndice B - PROCESSAMENTO DAS MENSAGENS DE PATH E RESV

Processamento de uma mensagem de PATH



Processamento do ERO (IETF, RFC3473, 2003)



Processamento da mensagem de RESV

