

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUIZ GUILHERME BERGAMASCHI BUELONI

**PROPOSTA DE PLANO DE CONTROLE PARA REDES ÓPTICAS DE TRANSPORTE
UTILIZANDO LSPs HIERÁRQUICOS**

VITÓRIA

2014

LUIZ GUILHERME BERGAMASCHI BUELONI

**PROPOSTA DE PLANO DE CONTROLE PARA REDES ÓPTICAS DE TRANSPORTE
UTILIZANDO LSPs HIERÁRQUICOS**

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.

Orientador: Prof. Dr. Anilton Salles Garcia

VITÓRIA

2014

LUIZ GUILHERME BERGAMASCHI BUELONI

**PROPOSTA DE PLANO DE CONTROLE PARA REDES ÓPTICAS DE
TRANSPORTE UTILIZANDO LSPs HIERÁRQUICOS**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Anilton Salles Garcia - Orientador
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Joberto Sérgio Barbosa Martins
Universidade Salvador

Prof. Dr. Magnos Martinello
Universidade Federal do Espírito Santo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela força, saúde e capacidade para chegar até aqui.

Aos meus pais por todo o apoio e incentivo, me fornecendo tudo que fosse necessário para que este objetivo fosse alcançado. Sempre lembrarei tudo que fizeram por mim.

Aos meus tios, por serem minha segunda família, minha segunda casa.

Aos amigos e companheiros de trabalho, Rodrigo Stange, Ramon Schiavo, Matheus Dilem, Rafael Campanharo, Carlos Vendramini, dentre outros, pelas discussões, ideias, críticas, correções e pelos bons momentos de conversa e descontração. Cada um com um pouco de ensinamento e aprendizado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Anilton, pela oportunidade de trabalho durante quase quatro anos, sempre preocupado em passar suas experiências profissionais e acadêmicas, resultando em um grande aprendizado.

Aos membros da banca, Joberto Sérgio Barbosa Martins e Magnos Martinello, pelo tempo dedicado à avaliação deste trabalho.

À Padtec pelos projetos desenvolvidos em parceria com a UFES, oferecendo uma visão industrial do cenário de pesquisa no mundo de telecomunicações.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pela oportunidade e suporte financeiro que permitiram a realização deste trabalho.

A todos os meus familiares e amigos próximos que sempre deram força e demonstraram apoio, carinho e incentivo.

RESUMO

A evolução das redes de telecomunicações permitiu o surgimento de novas classes de serviço que exigem cada vez mais das tecnologias de redes de núcleo. As exigências são de, cada vez mais, dinamicidade e capacidade de provisionamento de recursos para o transporte de informações baseado em demandas, uma característica conhecida como *BoD (Bandwidth on Demand)*. No plano de transporte, a tecnologia OTN (*Optical Transport Network*) sofreu recentes avanços para acompanhar essas demandas por dinamicidade, e vem se firmando como tecnologia de transporte para redes de núcleo. Integrando toda a capacidade de comutação e multiplexação OTN, tanto no domínio elétrico como óptico, surge um conceito de equipamento denominado *OTNSwitch* como solução para as redes de núcleo. Porém, ainda que o plano de transporte ofereça tal capacidade e dinamicidade, faz-se necessário a existência de um plano de controle capaz de atuar nos equipamentos e realizar a configuração de caminhos na rede, permitindo o suprimento das demandas. Esta dissertação tem como objetivo propor um plano de controle baseado nos protocolos GMPLS (*Generalized Multiprotocol Label Switching*) para o equipamento *OTNSwitch*, capaz de alocar recursos para uma demanda utilizando o conceito de LSPs (*Label Switch Path*) hierárquicos utilizando-se a capacidade de multiplexação TDM (*Time Division Multiplexing*) oferecida pela tecnologia OTN e melhor aproveitamento da capacidade de transmissão dos comprimentos de onda na rede.

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

ABSTRACT

The evolution of telecommunication networks has enabled the creation of new classes of services which keep increasing the demand to core network technologies. The requirements are more dynamism and ability to supply resources for transporting information based on demands, a feature known as BoD (Bandwidth on Demand). At the network core, Optical Transport Networks (OTN) presents advances to meet those requirements, and has been established as default network transport technology. Integrating capacities of switching and multiplexing at both optical and electrical domains, the concept of an OTNSwitch equipment emerges as a promising solution to the core networks. However, even when the Transport Plane offers such capabilities, the existence of a Control Plane is necessary to operate equipment and to perform configuration of paths in the network. In this work we propose extentions for a GMPLS (Generalized Multiprotocol Label Switching) based Control Plane, enabling communication and compatibly with an theoretical OTNSwitch equipment. We also discuss allocation of resources on demand using the concept of hierarchical LSPs.

Keywords: Control Plane, GMPLS, OTN Networks, OTNSwitch.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 - Evolução de arquitetura das redes de pesquisa (NRENs). (GUIDO MAIER, LORENZO, <i>et al.</i> , 2008).....	22
Figura 2-1 - Exemplo de modelagem funcional utilizando elementos da recomendação. (ITU-T, 2000)	33
Figura 2-2 - Fluxo de informação em uma rede OTN. (ITU-T, 2010)	35
Figura 2-3 - Multiplexação TDM. (ITU-T, 2010).....	37
Figura 2-4 - Multiplexação FDM.	38
Figura 2-5 - Multiplexação de ODUs em redes OTN. (VAEZ-GHAEMI, 2010).....	39
Figura 2-6 - Arquitetura <i>OTNSwitch</i> . (DILEM, FAVORETO, <i>et al.</i> , 2013).....	41
Figura 2-7 - Arquitetura de gerência. (ITU-T, 2012)	44
Figura 2-8 - Equipamento OTN com funcionalidade de plano de controle. (INIEWSKI, MCCROSKY e MINOLI, 2008)	46
Figura 2-9 - IP sobre OTN. (CHEN, 2006)	47
Figura 2-10 - Núcleo de comutação em equipamentos através de conversão O-E-O. (BERTHOLD, SALEH, <i>et al.</i> , 2008)	49
Figura 2-11 - LSPs em redes MPLS. (FAVORETO, 2009).....	52
Figura 2-12 - Hierarquia de LSPs no GMPLS. (MAIER, 2008).....	52
Figura 2-13 - Aninhamento de LSPs no GMPLS. (MAIER, 2008)	53
Figura 2-14 - Estabelecimento de LSPs hierárquicos no GMPLS. (MAIER, 2008) ...	54
Figura 2-15 - Estabelecimento e término de um LSP. (FAVORETO, 2009).....	58
Figura 2-16 - Rede óptica provendo o transporte de quatro fluxos, ingressando pelo nó I e emergindo pelos nós E1-E4, tendo os nós A, B e C como caminho comum. (DUTTA, KAMAL e ROUSKAS, 2008)	61
Figura 2-17 - Mapeamento dos fluxos em comprimentos de onda pela visão do nó I. (DUTTA, KAMAL e ROUSKAS, 2008)	62
Figura 2-18- Mapeamento dos fluxos em comprimentos de onda pela visão do nó I com capacidade de <i>grooming</i> . (DUTTA, KAMAL e ROUSKAS, 2008).....	62
Figura 2-19 - Hierarquia de LSPs.....	64
Figura 2-20 - Exemplo de hierarquia de multiplexação realizado na NIC.....	65

Figura 3-1 - Alocação de recurso no equipamento.....	67
Figura 3-2 - Integração do plano de controle ao sistema de gerência.....	69
Figura 3-3 - Arquitetura completa do controlador.....	70
Figura 3-4 - Arquitetura distribuida de plano de controle.....	70
Figura 3-5 - Mapeamento de recursos no TED.	72
Figura 3-6 - Processo de sinalização: Reserva e alocação de recursos.	75
Figura 3-7 - Configuração <i>Add/Drop</i> (a), configuração <i>Passthrough Óptico</i> (b) e configuração <i>Passthrough Elétrico</i> (c).....	78
Figura 3-8 - LSPs hierárquicos no <i>OTNSwitch</i>	82
Figura 3-9 - <i>Grooming</i> no <i>OTNSwitch</i>	83
Figura 3-10 - <i>Add/Drop</i> : Detalhe.	84
Figura 3-11 - Detalhamento dos LSPs estabelecidos.	85
Figura 4-1 - Hierarquia de módulos no OMNeT++. (PEREZ, 2005)	87
Figura 4-2 - <i>Control Plane Function</i> : Arquitetura de plano de controle.....	89
Figura 4-3 – Sequência de ações durante o processo de <i>path</i>	92
Figura 4-4 - Sequência de ações durante o processo de <i>resv</i>	93
Figura 5-1 - Cenário de teste 1: Topologia Mista.	96
Figura 5-2 - Bloqueio de sinal pela matriz sem configuração de comutação.	96
Figura 5-3 – Cenário 1: Base de dados do TED preenchida após o mapeamento de recursos do equipamento.....	97
Figura 5-4 - Exemplo de <i>log</i> após a localização de recursos realizada pela MIB.....	98
Figura 5-5 – <i>Log</i> gerado pelo OMNeT++: Troca de mensagens <i>hello</i> realizada pelo RSVP.	99
Figura 5-6 - <i>Log</i> gerado pelo OMNeT++: Troca de mensagens <i>link state</i> realizada pelo OSPF.....	99
Figura 5-7 - <i>Log</i> gerado pelo OMNeT++: Processamento da mensagem <i>path</i>	99
Figura 5-8 - <i>Log</i> gerado pelo OMNeT++: Reserva de recursos no equipamento....	100
Figura 5-9 – Cenário 1: Partes do arquivo de <i>log</i> para o estabelecimento do LSP de <i>ld = 1</i>	101

Figura 5-10 – Cenário 1: <i>Log do Trace</i> gerado pelo cliente 1A.....	103
Figura 5-11 – Cenário 1: <i>Log do Trace</i> gerado pelo cliente 2A.....	104
Figura 5-12 – Cenário 1: Alocação dos LSPs pelo plano de controle.	105
Figura 5-13 – Cenário 1: Arquivo de <i>log</i> do cliente 1A.....	106
Figura 5-14 - Cenário de teste 2: Topologia Anel.....	106
Figura 5-15 - Cenário 2: Base de dados do TED preenchida após o mapeamento de recursos do equipamento.....	108
Figura 5-16 – Cenário 2: Partes do arquivo de log para o estabelecimento do LSP de Id = 1.	108
Figura 5-17 - <i>Log do Trace</i> gerado pelo cliente 1A.	109
Figura 5-18 - <i>Log do Trace</i> gerado pelo cliente 2A.	110
Figura 5-19 - <i>Log do Trace</i> gerado pelo cliente 5A.	111
Figura 5-20 – Cenário 2: Alocação dos LSPs pelo plano de controle.	112
Figura 5-21 - Cenário 2: Arquivo de log do cliente 1A.....	112
Figura I-0-1 - Diagrama de fluxo do processamento de uma mensagem de sinalização do plano de controle.	121
Figura II-0-1 - Diagrama de fluxo do processo de reserva de recurso realizado pelo plano de controle.....	122
Figura III-0-1 - Diagrama de sequência do processo de configuração do equipamento.....	123

LISTA DE SIGLAS/ACRÔNIMOS

ATM - *Asynchronous Transfer Mode*

ADM - *Add/Drop Multiplexer*

AP - *Access Point*

APS - *Automatic Protection Switch*

ASON - *Architecture for the Automatically Switched Optical Network*

BER - *Bit Error Rate*

CIC - *Client Interface Card*

CP - *Connection Point*

DCN - *Data Communication Network*

DSC - *Digital Cross-connect System*

DTH - *Digital Transport Hierarchy*

EMF - *Equipment Management Function*

FA-LSP - *Forward Adjacency LSP*

FCAPS - *Fault, Configuration, Accounting, Performance and Security*

FDM - *Frequency Division Multiplexing*

FEC - *Forward Error Correction*

FSC - *Fiber Switch Capable*

Gbps - *Gigabits por segundo*

GFP - *Generic Frame Procedure*

GMPLS - *Generalized Multiprotocol Label Switching*

IA-RWA - *Impairment Aware Lightpath Routing Wavelength Assignment*

IETF - *Internet Engineering Task Force*

IP - *Internet Protocol*

ISC - *Interface Switching Capable*

ISDN - *Integrated Services Digital Network*

ITU-T - *International Telecommunications Union - Telecommunication Standardization Sector*

L2SC - *Layer-2 Switch Capable*

LMP - *Link Management Protocol*

LSA - *Link State Advertisement*

LSC - *Label Switch Capable*

LSP - *Label Switched Path*

LSR - *Label Switching Routers*

MCF - *Message Communication Function*

MPLS - *Multiprotocol Label Switching*

NED - *NEtwork Description*

NEF - *Network Element Function*

NERNS - *National Research and Education Networks*

NG-OTN - *Next Generation OTN*

NIC - *Network Interface Card*

OCH - *Optical Channel Layer*

OCS - *Optical Circuit Switching*

ODU - *Optical Channel Data Unit*

ODU HO - *ODU High Order*

ODU LO - *ODU Low Order*

O-E-O - *Óptico-Eléctrico-Óptico*

OIC - *Optical Interface Card*

OMS - *Optical Multiplex Sections*

OPEX - *Operational Expenditure*

OPU - *Optical Channel Payload Unit*

OSI - *Open System Interconnection*

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

OTH - *Optical Transport Hierarchy*

OTM - *Optical Transport Module*

OTN - *Optical Transport Network*

OTS - *Optical Transport Section*

OTU - *Optical Channel Transport Unit*

OXC - *Optical Cross-Connect*

PCE - *Path Computation Element*

PSB - *Path State Block*

PSC - *Packet Switch Capable*

PSTN - *Public Switching Telephone Network*

PT-21 - *Payload Type 21*

QoS - *Quality of Service*

ROADM - *Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer*

RP - *Reference Point*

RSVP-TE - *Resource Reservation Protocol - Traffic Engineering*

SDH - *Synchronous Digital Hierarchy*

SDN - *Software Defined Network*

SONET - *Synchronous Optical Networking*

SRGL - *Shared Risk Link Group*

TCP - *Termination Connection Point*

TDM - *Time Division Multiplexing*

TED - *Traffic Engineering Database*

WCC - *Wavelength Continuity Constraint*

WDM - *Wavelength Division Multiplexing*

WSS - *Wavelength Selective Switching*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.2	MOTIVAÇÃO	21
1.3	JUSTIFICATIVA.....	23
1.4	OBJETIVOS	24
1.5	TRABALHOS RELACIONADOS.....	26
1.5.1	Revisão Bibliográfica	26
1.6	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES	29
1.7	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	30
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	31
2.1	REDES ÓPTICAS DE TRANSPORTE	31
2.1.1	Organização em Camadas	32
2.1.2	Multiplexação e Comutação nos Domínios Óptico e Elétrico	36
2.2	<i>OTNSWITCH</i> : ARQUITETURA.....	39
2.2.1	Descrição da Arquitetura	40
2.2.2	Gerenciamento do Equipamento	43
2.3	PLANO DE CONTROLE PARA REDES ÓPTICAS	45
2.3.1	Requisitos de Plano de Controle para Redes Ópticas de Nova Geração.....	46
2.3.2	GMPLS: <i>Generalized Multiprotocol Label Switching</i>	50
2.3.3	Mapeamento de Redes OTN no modelo GMPLS.....	59
2.4	<i>GROOMING</i> DE TRÁFEGO EM REDES ÓPTICAS.....	60
2.4.1	<i>Grooming</i> de Tráfego em Redes OTN e LSPs Hierárquicos	63
3	DESENVOLVIMENTO.....	67
3.1	PLANO DE CONTROLE PARA REDES DE NÚCLEO BASEADAS EM <i>OTNSWITCH</i>	67
3.1.1	Plano de Controle para o Equipamento <i>OTNSwitch</i>	68
4	IMPLEMENTAÇÃO	86
4.1	OMNET++: SIMULAÇÃO DE REDES OTN	86

4.2	MODELAGEM DA ARQUITETURA	88
4.2.1	Arquitetura de Plano de Controle.....	88
5	VALIDAÇÃO	94
5.1	REDES DE TESTE	94
5.1.1	Cenário de Teste 1 – Rede de Topologia Mista	95
5.1.2	Cenário de Teste 2 – Rede de Topologia Anel.....	106
6	CONCLUSÃO.....	113
6.1	RESULTADOS.....	113
6.2	TRABALHOS FUTUROS.....	114
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116
	APÊNDICE I	121
	APÊNDICE II	122
	APÊNDICE III	123
	APÊNDICE IV	124
	APÊNDICE V	126

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Certamente, as redes de computadores, e mais especificamente a internet, mudou a forma como os processos ocorrem atualmente, seja no mundo dos negócios, educação ou na sociedade em geral (Dutta, Kamal, & Rouskas, 2008).

O grande crescimento do uso da internet e da *Word Wide Web*, tanto em termos de número de usuários quanto em horas de uso, força a indústria de telecomunicações a dispender um esforço enorme de pesquisa e desenvolvimento visando atender as demandas de uso e aplicações (Ramaswami, Sivarajan, & Sasaki, 2010). O estabelecimento de novas classes de serviço, como *streaming* de vídeos de alta definição, TV sob demanda, *backup*, sincronismo de dados através da nuvem computacional, e compartilhamento de arquivos cada vez maiores, muitos desses serviços abrangendo inclusive dispositivos móveis, constituem um desafio cada vez maior para as redes de núcleo. Observa-se também um grande crescimento na demanda por aplicações científicas de alto desempenho, como física de alta energia, astronomia, bioinformática, telemedicina, visualização remota, entre outras, denominadas *e-Science*. Tais aplicações refletem uma nova realidade de pesquisa onde existe colaboração entre diversos grupos situados em localidades distintas, inclusive em diversos continentes.

Algumas das características dessas aplicações é o grande volume de informações manipuladas, que pode chegar à ordem de *terabytes* e *petabytes* de dados, e a sensibilidade a atrasos excessivos. Por essa razão, as redes que oferecem suporte a esses tipos de aplicações devem ser adaptadas para atender aos requisitos impostos pelas mesmas. Adicionalmente, surge uma grande demanda por *data centers* capazes de manipular e tratar um grande volume de dados, assim como para a integração entre eles. Tais volumes de dados precisam ser transferidos entre locais distintos, demandando uma infraestrutura de rede cuja capacidade está disponível apenas na tecnologia óptica.

O desenvolvimento de fibras e dispositivos capazes de realizar comunicação por princípios ópticos iniciou-se na década de 1960 e continua sofrendo significativos avanços nos tempos atuais. A velocidade e qualidade dos sistemas de comunicações ópticos permitiu o desenvolvimento de novos tipos de sistemas de comunicações eletrônicos designados a utilizar enlaces ópticos. O ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) e o SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) são bons exemplos a serem citados (IBM, 1998).

Durante muitos anos, o ATM e o SDH, juntamente com outras tecnologias de rede, atenderam prontamente as demandas exigidas pelos usuários e aplicações. Porém, a evolução natural da tecnologia óptica e as novas demandas de tráfego e aplicações direcionaram para o desenvolvimento de uma nova arquitetura de rede de transporte. Desde 1990, novas capacidades foram permitidas pelo desenvolvimento de componentes ópticos, particularmente a capacidade de transmissão de múltiplos comprimentos de onda em uma única fibra. Tal tecnologia estimulou a ITU-T (*International Telecommunications Union—Telecommunication Standardization Sector*) a desenvolver uma nova série de estudos e recomendações para empregar essas novas capacidades ópticas. Assim surgiu a tecnologia OTN (*Optical Transport Network*) (ITU-T, 2010).

Além de englobar os avanços da tecnologia óptica, os padrões OTN buscaram combinar múltiplas redes e serviços em uma única infraestrutura já preparada para aplicações futuras. Assim, OTN tem a capacidade de “empacotar” qualquer serviço em um container óptico-digital, provendo ao sinal cliente da rede um serviço transparente, entregando flexibilidade e suporte a todos os tipos de tráfego: voz, vídeo, dados e imagens.

Dentre as características das redes OTN, podem ser destacadas (ITU-T, 2010):

- Hierarquia digital preparada para altas taxas de transmissão de dados, capaz de transportar um cliente 100 Gbit/s *Ethernet* em um único comprimento de onda na fibra;
- Utiliza técnica de FEC (*Forward Error Correction*) no cabeçalho de seu quadro, permitindo baixas taxas de erro de *bit*, mesmo em transmissões de altas taxas de dados e distancias relativamente grandes;

- Herda do SDH a capacidade de monitorar conexões fim-a-fim e de segmentos de enlace. O cabeçalho de monitoramento inclui identificação do sinal, informação de erros e informação de alarmes. Assim, provê funções de operação, administração, manutenção e aprovisionamento;
- Transporte de todos os tipos de tráfego de pacote incluindo IP, MPLS (*Multiprotocol Label Switching*) e *Ethernet*. Também permite o transporte de quadro SDH, incluindo o cabeçalho, de forma transparente;
- Mapeamento plesiócrono, onde o relógio do quadro OTN (*Optical Transport Network*) é gerado independente do sinal cliente, permitindo simplificação de implementação e redução de custos. Também possui mapeamento síncrono de quadro, onde o relógio do quadro OTN é derivado do sinal cliente.

Com o desenvolvimento do padrão OTN na camada de transporte, as aplicações ganharam um meio robusto para a transmissão de dados, porém ainda torna-se necessário tratar a questão da dinamicidade das aplicações. Mais recentemente surgiu a iniciativa das Redes Ópticas de Transporte Comutadas, onde a comutação pode ocorrer tanto nas camadas elétricas (quadros representados por pulsos elétricos) quanto na camada óptica (informação representada por pulsos eletromagnéticos em determinado comprimento de onda). Essa característica técnica é definida pela ITU-T na recomendação G.8080 (ITU-T, 2012), conhecida na literatura como ASON (*Architecture for the Automatically Switched Optical Network*). Essa tecnologia permite a comutação óptica e certo dinamismo de configuração de enlaces, utilizando-se de componentes como os ROADMs (*Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer*) e OXC (*Optical Cross-Connect*) transparentes e outros comutadores que combinam a comutação elétrica com a óptica (Liu, Tsuritani, & Morita, Experimental Demonstration of OpenFlow/GMPLS Interworking Control Plane for IP/DWDM Multi-Layer Networks, 2012).

Aproveitando a tecnologia OTN e sua capacidade de multiplexação e comutação de tráfego, tanto em nível óptico como elétrico, surgiu um novo conceito de equipamento, denominado pela indústria e academia como *OTNSwitch*. Além de toda a dinamicidade, o *OTNSwitch* insere no contexto de redes ópticas atuais a capacidade de *grooming* de tráfego, aproveitando a capacidade de multiplexação da tecnologia OTN (Dilem, Favoreto, Tessinari, Bueloni, & Garcia, 2013). A capacidade

de *grooming* permite que os recursos de transmissão não fiquem subutilizados, realizando a agregação de tráfego para a partilha de um meio de transmissão (um comprimento de onda, por exemplo), otimizando a banda disponível.

Todavia, tal capacidade e dinamicidade não são aproveitadas de forma efetiva, uma vez que os mecanismos de controle e gerenciamento utilizados atualmente apresentam várias limitações, sobrecarregando os operadores de rede, dificultando o provimento de novos serviços e aumentando os custos de operação (OPEX - *Operational Expenditure*). Os principais problemas relacionados às redes ópticas atuais podem ser pontuados (Jajszczyk, *Automatically switched optical networks: benefits and requirements*, 2005):

- Erros causados por configuração manual;
- Longos tempos de provisionamento de serviços;
- Utilização ineficiente de recursos;
- Dificuldade de interoperabilidade entre as redes de comutação de pacotes e redes de comutação de circuitos;
- Complexidade no gerenciamento de rede;
- Ineficiência de proteção e restauração;
- Dificuldade de interoperabilidade entre diferentes operadores.

Com a introdução do conceito de ASON, surgiu a necessidade de realizar estudos para a evolução do plano de controle, buscando atingir facilidades de operação, restauração, flexibilidade e desempenho. O primeiro plano de controle de sucesso foi o utilizado nas redes SONET/SDH, sendo capaz de garantir sobrevivência da rede e reduzir custos de operação. Porém, muitos desafios e barreiras devem ser superados para que um plano de controle atinja seu total potencial. Pesquisas têm sido realizadas para desenvolver um plano de controle capaz de atuar em equipamentos independentes de fabricantes e domínios. Outro caminho fortemente trilhado em linhas de pesquisas é a evolução do plano de controle para atender tecnologias emergentes, como OTN, NG-OTN (*Next Generation OTN*) e transporte de pacotes.

A evolução da tecnologia de plano de controle para redes ópticas de nova geração visa corrigir os problemas e dificuldades mencionados anteriormente, permitindo aos

operadores de rede (Jajszczyk, Control Plane for Optical Networks: The ASON Approach, 2004):

- Aprovisionamento rápido de novos serviços;
- Facilidade na operação da rede;
- Escalabilidade;
- Planejamento e projeto simplificado;
- Alta eficiência no uso de recursos.

Os dois maiores órgãos de padronização de telecomunicações vêm empreendendo muito esforço, juntamente com a comunidade científica, para padronização do plano de controle das redes ópticas do futuro. A IETF (*Internet Engineering Task Force*) e a ITU-T (*International Telecommunications Union—Telecommunication Standardization Sector*). A IETF vem focando seu trabalho na especificação de protocolos de roteamento e reserva de caminho dado sua experiência com os protocolos utilizados no mundo IP. Assim, define uma pilha de protocolos base para plano de controle de redes ópticas, o GMPLS (*Generalized Multiprotocol Label Switching*) (Farrel & Bryskin, 2006). A ITU-T foca seu trabalho em levantar requisitos para plano de controle de redes ópticas (SDH e OTN), propõe um *framework* básico chamado ASON (ITU-T, 2012) que identifica os principais blocos funcionais e interfaces que são necessárias ao plano de controle para prover serviços, independente de protocolos.

A padronização existe para guiar pesquisadores e desenvolvedores na elaboração de soluções de plano de controle, mas há de se ressaltar que ela está longe de cobrir todos os requisitos atuais de redes de transporte e de definir uma ferramenta fechada de plano de controle, além de haver muitas inconsistências e lacunas a serem tratadas. A tecnologia de redes como um todo, inclusive a de plano de controle, encontra-se em evolução e muitas vezes a abordagem das padronizações não consideram novas questões que se encontram em fase de desenvolvimento e amadurecimento, cabendo às pesquisas científicas e aplicadas questionar e verificar se a padronização atende de forma satisfatória e, caso não atenda, apresentar novas soluções fundamentadas na teoria já existente para garantir o avanço tecnológico que se faz necessário.

1.2 MOTIVAÇÃO

As aplicações que demandam serviços da rede, tanto atuais como futuras se baseiam um conceito de serviço conhecido como banda sob demanda (*BoD – Bandwidth on Demand*), onde os recursos da rede são alocados de acordo com a necessidade da aplicação. Esse conceito torna-se inviável se não existir um grau de automatização no estabelecimento de chamadas na rede, papel desempenhado pelo plano de controle através de seus processos de roteamento e sinalização.

Atualmente, as redes de telecomunicações são multicamada, IP sobre OTN sobre WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). Na camada IP, o MPLS possui mecanismos para prover engenharia de tráfego implementando classes de serviços e garantias de *QoS (Quality of Service)*, o que fez dele uma tecnologia bastante utilizada. Todavia, essas vantagens podem ser limitadas se as camadas inferiores não oferecem recursos de forma adequada, juntamente com um ambiente flexível e configurável.

Um exemplo a se considerar são as redes de pesquisa (*NERNs - National Research and Education Networks*) que proviam serviço para aplicações que não tinham requisitos de *QoS* críticos. Neste caso, essas redes mantinham uma estrutura IP, onde os serviços eram provisionados da forma tradicional IP, o melhor esforço. Caso alguma diferenciação precisasse ser dada ao serviço, era utilizado uma classe “*premium*” para um encaminhamento diferenciado do tráfego. Tradicionalmente as NRENs construía suas infraestruturas baseadas em roteadores IP, conectados por enlaces WDM (Guido Maier, Lorenzo, Dario Giuseppe, Achille Pattavina, & Péter Szegedi, 2008).

Recentemente, com a evolução dos serviços, é demandado da rede o transporte de tráfego com garantias rigorosas de *QoS* sobre conexões dedicadas. Na maioria dos casos, para atender a esse requisito, são criados túneis em camada 2 para o transporte de MPLS LSPs. Uma solução satisfatória, embora o MPLS seja utilizado apenas com propósito de gerenciamento e organização, e não para entregar as garantias de *QoS* necessárias. Diante de mais necessidade de atender aos requisitos de *QoS*, as NERNs vêm investindo em sua própria infraestrutura de rede baseadas em sistemas de transmissão WDM e substituindo o MPLS LSP (*Label*

Switched Path) em camada 2 por circuitos de camada 1 implementados sobre redes ópticas de transporte (OTN), o que significa canais SDH sobre caminhos ópticos para garantir os requisitos de QoS, uma arquitetura conhecida como “IP sobre OTN”. Essa estrutura de transporte é dada como a que atende as aplicações futuras e suas altas sensibilidades a QoS.

O provisionamento de serviços até o momento é feito via sistema de gerenciamento de forma manual. O desafio dos pesquisadores e diversos projetos de pesquisa é inserir um plano de controle dedicado que permite o provisionamento de serviços automaticamente, baseado na atual característica de serviços *BoD*. Esse modelo é baseado em tecnologias e protocolos inteligentes desenvolvidos para plano de controle de redes ópticas, já pensados para atender a essa demanda de dinamicidade, a saber, a arquitetura ASON e os protocolos GMPLS.

A introdução do plano de controle cria uma nova arquitetura: “IP sobre ASON/GMPLS” (Guido Maier, Lorenzo, Dario Giuseppe, Achille Pattavina, & Péter Szegedi, 2008), onde uma instância do plano de controle é capaz de atuar sobre os nós da rede e provisionar serviços sob demanda. A Figura 1-1 ilustra a evolução da arquitetura utilizada nas redes de pesquisa, desde o “IP puro” até o “IP sobre ASON/GMPLS”.

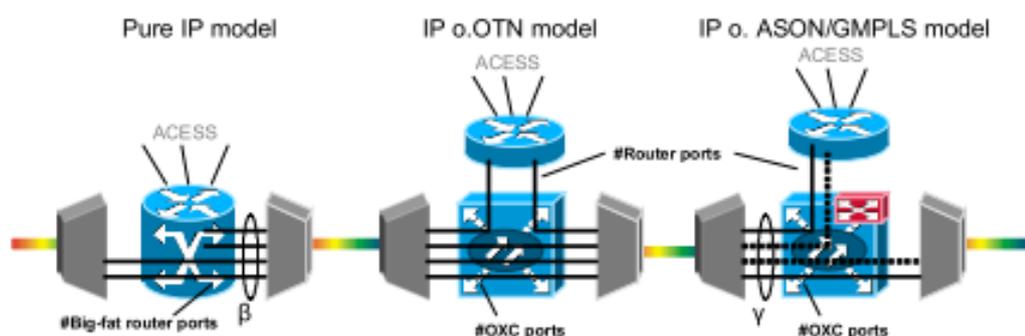


Figura 1-1 - Evolução de arquitetura das redes de pesquisa (NRENs). (Guido Maier, Lorenzo, Dario Giuseppe, Achille Pattavina, & Péter Szegedi, 2008)

Na busca pelo desenvolvimento de uma rede de transporte com as características de flexibilidade e configuração necessárias, surge o *OTNSwitch*. Porém, de nada adianta um equipamento que atenda as exigências sem que exista um plano de controle capaz de atuar na configuração do equipamento durante o estabelecimento de caminhos diante de uma demanda. Ainda se faz necessário que o plano de

controle entenda os recursos envolvidos durante o estabelecimento de um caminho, para que os mesmos sejam utilizados de forma eficiente.

Em suma, o *OTNSwitch* apresenta um cenário ideal para o desenvolvimento de um plano de controle baseado nos conceitos de redes ópticas comutadas, implementados pela pilha de protocolo GMPLS, apontado pela indústria e academia como o plano de controle para as redes ópticas de transporte (Ciena, 2011), (Liu, Tsuritani, & Morita, From GMPLS to PCE/GMPLS to OpenFlow: How Much Benefit can We Get from the Technical Evolution of Control Plane in Optical Networks?, 2012). O equipamento permite, através de sua capacidade de multiplexação e comutação óptica e elétrica, que o conceito de LSPs (*Label Switched Path*) hierárquicos do GMPLS seja aplicado no estabelecimento de caminhos, permitindo que um LSP de alta capacidade de transmissão, ou de outro domínio de comutação, já alocado para transporte, seja utilizado como túnel para um LSP de capacidade de transmissão inferior, proporcionando a capacidade de *grooming* de tráfego, utilizando assim recursos disponíveis na rede de uma maneira a melhor aproveitá-los.

1.3 JUSTIFICATIVA

Diante do fato da tecnologia *OTNSwitch* ainda estar em desenvolvimento, e das carências mencionadas relativas ao emprego de um plano de controle que prontamente atenda às necessidades de configuração e dinamicidade da rede no que diz respeito à criação de caminhos, este trabalho se justifica em propor um plano de controle que atue no *OTNSwitch*. O plano de controle deve atender às demandas de comunicação fim-a-fim entre os clientes da rede, comutando todo o tráfego a nível TDM e de comprimento de onda utilizando a capacidade de comutação e *grooming* de tráfego do equipamento.

A adição de um plano de controle capaz de rotear um tráfego na camada de transporte evitando o roteamento IP implica em diminuir os custos de operação, por não ser necessário o roteamento IP no núcleo da rede, apenas nas bordas. Isso impacta na velocidade da rede, por estar submetendo o sinal a menos

processamento, e nos custos, por utilizar menos portas IP para rotear o tráfego, que normalmente possui valores elevados (Katib & Medhi, 2012). Além dos impactos já citados, evitar o roteamento IP no núcleo da rede tem outra vantagem. O roteamento IP/MPLS apresenta como característica um alto consumo de energia. Assim, ao delegar as funções à camada OTN, comutando *slots* TDM e comprimentos de onda melhora a relação “custo energético x *bits*”.

Os processos e protocolos de roteamento e sinalização para estabelecimento de caminhos do GMPLS são padronizados, porém esses processos são genéricos e podem ser aplicados em qualquer arquitetura de rede. Logo, existe um trabalho entre entender os processos e protocolos do GMPLS e instanciar os elementos de plano de controle para que ele possa entender e atuar em uma determinada tecnologia.

É economicamente inviável montar um *testbed* real utilizando equipamentos OTN para prova de conceito do plano de controle. Portanto, a prova de conceito é realizada aplicando o plano de controle a um modelo que visa reproduzir o comportamento do *OTNSwitch* baseado nas recomendações da ITU-T, validado em (Dilem, Favoreto, Tessinari, Bueloni, & Garcia, 2013).

Esta dissertação se insere na linha de trabalho que vem sendo desenvolvido pelo grupo de pesquisas em redes ópticas de transporte, inseridos no Laboratório de Telecomunicações da UFES (LABTEL), que tem como objetivo desenvolver um *framework* de simulação de redes ópticas de transporte, seguindo as recomendações ITU-T e IETF. O *framework* é desenvolvido utilizando o simulador de eventos discretos OMNeT++ (*Objective Modular Network Testbed*).

1.4 OBJETIVOS

Esta dissertação tem como objetivo geral propor um plano de controle GMPLS distribuído, com o controlador localizado na função de plano de controle, presente no EMF (*Equipment Management Function*) do NEF (*Network Element Function*) do equipamento *OTNSwitch*, organização proposta pela recomendação ITU-T G.7718 (ITU-T, 2010).

O plano de controle deve mapear os recursos de comutação do equipamento para que, através dos processos de sinalização e roteamento realizados pela troca de mensagens dos protocolos pela rede DCN (*Data Communication Network*), seja possível estabelecer LSPs hierárquicos na rede de forma automatizada, utilizando os LSPs de alta ordem para o transporte de vários LSPs de baixa ordem através do *grooming* de tráfego suportado pela multiplexação TDM oferecida pela tecnologia OTN. O estabelecimento de caminhos também depende da capacidade do equipamento entender os comandos do plano de controle para configurar suas matrizes de conexão óptica e elétrica, direcionando corretamente o tráfego ao recurso alocado pelo plano de controle. Por fim, a criação desses LSPs hierárquicos deve permitir a comunicação fim-a-fim dos clientes sem prejuízos, utilizando a capacidade de *grooming* oferecida pelo *OTNSwitch*.

Esta dissertação não tem por objetivo a análise e desenvolvimento de algoritmos capazes de otimizar o uso de recursos na rede. É proposto como utilizar a capacidade de multiplexação do equipamento para que os recursos sejam melhores aproveitados, utilizando, por exemplo, um único comprimento de onda (LSP óptico) para o transporte de vários sinais clientes multiplexados (vários LSPs elétricos de baixa ordem multiplexados em um LSP elétrico de alta ordem), evitando mapear cada cliente direto em um comprimento de onda, subutilizando o recurso.

Para alcançar tal objetivo, os seguintes objetivos específicos precisaram ser alcançados:

- Mapear os recursos de comutação do *OTNSwitch* e disponibilizar ao plano de controle, a fim de controlar e gerenciar tais recursos;
- Desenvolver um conjunto de primitivas permitindo ao plano de controle configurar as matrizes de comutação do equipamento através do sistema de gerência, dadas as requisições da rede;
- Analisar os protocolos de sinalização e roteamento do GMPLS e realizar as devidas modificações para que seja possível o estabelecimento de LSPs hierárquicos;

1.5 TRABALHOS RELACIONADOS

Nas atividades de pesquisa em redes ópticas de transporte realizadas no LABTEL, um estudo inicial do plano de controle foi resultado da dissertação de mestrado de Felipe Pedroni Favoreto (Favoreto F. P., 2009). Porém, em seu trabalho são descritos alguns trabalhos futuros considerados importantes como, por exemplo, melhorar o estabelecimento de OCH LSP (*Label Switched Path*) incrementando a parte de erros de sinalização, expandir o estabelecimento de LSP para o nível elétrico da OTN (ODU LSP). A dissertação de mestrado de Rodrigo Stange Tessinari (Tessinari, 2011) expande o plano de controle do trabalho citado anteriormente, porém deixa em aberto o problema de estabelecimento de LSP em nível elétrico. A dissertação de mestrado de Fabbiano Fiorin Ferrari (Ferrari, 2011) propõe o uso do protocolo de gerenciamento de enlace (LMP – *Link Management Protocol*) para descoberta de capacidades no nível elétrico OTN e sugere na seção de trabalhos futuros o uso das informações obtidas pelo LMP para o estabelecimento de ODU LSP. De forma mais próxima encontram-se relacionados às dissertações de mestrado de Matheus Brunoro Dilem (Dilem M. B., 2014), onde é proposta a arquitetura de OTN *Switch* baseada nas recomendações da ITU-T que é utilizada neste trabalho, e Rafael Campanharo Favoreto (Favoreto R. C., 2014), que desenvolve a arquitetura de gerência para o equipamento e apresenta uma proposta para o levantamento de inventário de equipamentos. Todos os trabalhos mencionados até então utilizam um *framework* de simulação de redes ópticas de transporte (OTN), que vem sendo desenvolvido ao longo da evolução e conclusão dos trabalhos.

1.5.1 Revisão Bibliográfica

Durante a revisão bibliográfica que direcionou a proposta atual desta dissertação, alguns trabalhos publicados na comunidade científica tiveram certo destaque na contextualização do trabalho proposto.

Em (Chen, 2006), o autor afirma que a abordagem de roteamento dinâmico de comprimento de onda, combinado com o roteamento clássico IP, é um requisito para

as redes ópticas do futuro. Dados os requisitos de QoS (*Quality of Service*), é proposto no trabalho um plano de controle integrado baseado em GMPLS, uma vez que o GMPLS é capaz de atender requisitos IP e ópticos: comutação de pacote, comutação TDM (*Time Division Multiplexing*), comutação de comprimento de onda e comutação de fibra. Assim, o plano de controle proposto no trabalho visa mostrar que é possível integrar as camadas da rede e proporcionar a alocação de diferentes tipos de serviços IP, em diferentes *Time Slots*, em diferentes comprimentos de onda/fibras.

Em (Katib & Medhi, 2012), o enfoque é dado para redes multicamadas, utilizando-se IP/MPLS sobre OTN sobre WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). O trabalho aponta que esse tipo de rede tem tido atenção na literatura e que a arquitetura é uma ponte promissora para a interação entre IP e redes ópticas. É apresentado um modelo de otimização baseado em heurística integrada de capacidade para aperfeiçoar a utilização da rede (problema considerado NP-*Hard*), efetuando roteamento e reservas de capacidades aplicadas em todas as camadas, baseada na demanda fim-a-fim. Trata-se de um algoritmo que deve rodar antes da configuração da rede, porém o autor demonstra como a capacidade de *grooming* pode ser utilizada para que demandas possam compartilhar recursos de transporte na rede.

Em (Hu, et al., 2011), o autor apresenta uma preocupação com o consumo de energia das redes de núcleo baseadas em IP/MPLS, e apresenta as redes ópticas como solução para redução do consumo energético, uma vez que a relação energia/bit é muito menor. Dado o exposto, o trabalho ressalta a importância da comutação de comprimento de onda e subcomprimento de onda (no contexto OTN, ODU), o que viabiliza a abstração de IP/MPLS dentro de OTN. É destacado no trabalho que com a existência de plano de controle fundamentado em GMPLS, redes OTN de próxima geração podem alcançar a dinamicidade e inteligência para comutar várias granularidades dentro das múltiplas camadas.

Em (Liu, Tsuritani, & Morita, From GMPLS to PCE/GMPLS to OpenFlow: How Much Benefit can We Get from the Technical Evolution of Control Plane in Optical Networks?, 2012) os autores apontam que as técnicas de plano de controle são muito importantes para as redes ópticas, permitindo o provisionamento dinâmico, restauração e inteligência da rede. É demonstrado no trabalho as pesquisas

recentes na área de plano de controle baseado em GMPLS, PCE (*Path Computation Element*)/GMPLS e Redes SDN (*Software Defined Network*). No trabalho também são mostrados quais os benefícios foram alcançados com a evolução da tecnologia. A linha GMPLS aponta para a direção de estender o protocolo com funcionalidades de roteamento baseado em restrições, como continuação de comprimento de onda (WCC – *Wavelength Continuity Constraint*) e restrições físicas, e atribuição de comprimento de onda (IA-RWA - *Impairment Aware Lightpath Routing Wavelength Assignment*). Na linha PCE/GMPLS, o trabalho destaca a atenção que o PCE tem tido desde a introdução de seu conceito, permitindo vantagens e aprimoramentos na funcionalidade de cálculo de rotas em um elemento separado do GMPLS. É exposta uma arquitetura e extensões nas mensagens GMPLS para atendimento da nova maneira de cálculo de rotas. Na linha *OpenFlow*, mostra que para cada nó comutador óptico, um comutador *OpenFlow* virtual (VOFS) é introduzido, onde as interfaces *Ethernet* desse comutador virtual são virtualizadas sobre as interfaces físicas do comutador óptico, dando origem a um novo comutador, o *OpenFlow-enabled PXC* (OF-PXC), controlado por um controlador *OpenFlow* externo responsável pelo cálculo de rotas. Por fim, uma comparação é feita entre as três abordagens, indicando o *OpenFlow* como sendo simples, flexível e gerenciável, porém ainda imaturo, para o controle de redes ópticas quando comparado com GMPLS e PCE/GMPLS.

Em um estudo mais recente, (Casellas, et al., 2014) aborda o problema de aumento de fluxo de dados entre *datacenters*, causados pela transferência de máquinas virtuais e *backup* em lugares remotos. O autor propõe o uso de uma arquitetura baseada em *OpenFlow* e GMPLS. O *OpenFlow* é proposto por ser flexível ao ponto de atender aos requisitos impostos pelas aplicações de *datacenter*, enquanto o GMPLS é proposto por sua maturidade e aplicação comprovada em diversos trabalhos. Logo, a integração entre *OpenFlow* e GMPLS precisa ser considerada e resolvida. O uso de SDN (*Software Defined Network*) em redes ópticas é bem investigado, não apenas por sua flexibilidade, dinamicidade e controle descentralizado e desacoplado, mas por seu potencial de simplificação e melhor integração com interfaces abertas e padronizadas. O trabalho aborda uma arquitetura SDN baseado na cooperação entre *OpenFlow* e GMPLS para o provisionamento fim-a-fim de conexões sobre demanda entre *datacenters*.

Em (Ong, Roch, Shew, & Smith, 2012), os autores expõem as novas tecnologias e direções para plano de controle óptico. O trabalho expõe os desafios e impactos que novas tecnologias e a evolução das tecnologias atuais trazem para o plano de controle. Com a OTNv3 (denominação dada à OTN após sua atualização em 2009, que introduziu novas funcionalidades e novas taxas de sinais suportados, destacando-se o ODU0 e ODUflex), vários estágios de multiplexação e a nova granularidade de 1.25Gbps, fazem com que o GMPLS tenha que ser adaptado para atender os novos requisitos de alocação de caminhos.

Quando a tecnologia OTN é abordada nos trabalhos mencionados, ela é apontada apenas como uma tecnologia de transporte, estabelecendo uma conexão fim-a-fim, não uma camada de transporte distinta das outras, que provê funcionalidades de comutação e multiplexação. Tais funcionalidades são delegadas a outras camadas. Portanto, as propostas de aplicação de plano de controle aplicadas a redes multicamadas não leva em consideração a dinamicidade que as redes OTN podem oferecer.

Esta dissertação visa desenvolver um plano de controle baseado em GMPLS, apontado nos trabalhos como a abordagem mais consolidada, que leve em consideração as capacidades de comutação e multiplexação oferecidas pela tecnologia OTN para criar uma camada de transporte distinta, mais flexível e configurável. Essa abordagem permite que a capacidade das redes OTN seja utilizada de uma forma concreta, delegando à própria camada OTN funções de roteamento, por exemplo.

1.6 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

A principal contribuição deste trabalho é o desenvolvimento de um plano de controle utilizando o conceito de LSPs hierárquicos integrado ao *OTNSwitch* e seu sistema de gerência, desenvolvido no *framework* de simulação de redes OTN.

É importante mencionar que este trabalho obteve uma importante publicação científica, o capítulo “Arquiteturas de Plano de Controle para Redes Ópticas de Nova Geração Utilizando LSPs Hierárquicos”, no livro “Telecomunicações: Teoria,

Avanços e Aplicações”, ed.Campinas: Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 2013, v. 01, página 133-180, ISBN: 978-85-89748-08-7, publicado no Simpósio Brasileiro de Telecomunicações de 2013. Juntamente ao capítulo de livro, foi ministrado pelo autor deste trabalho um minicurso com o mesmo título no Simpósio. Outro resultado direto foi a contribuição na publicação do artigo (Dilem, Favoreto, Tessinari, Bueloni, & Garcia, 2013), onde uma versão inicial da arquitetura do equipamento *OTNSwitch* de acordo com as recomendações ITU-T é apresentada.

1.7 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A dissertação apresenta no capítulo 2 uma breve apresentação das redes ópticas de transporte (OTN) e do equipamento *OTNSwitch*, que envolve todas as funcionalidades de comutação e multiplexação, tanto óptica quanto elétrica das redes OTN. Num segundo momento o capítulo apresenta os requisitos para plano de controle de redes ópticas atuais e futuras, apresentando o GMPLS e o conceito de *grooming* através de LSPs hierárquicos em redes OTN.

O capítulo 3 apresenta uma proposta de plano de controle e principais aspectos de operação para o *OTNSwitch*, capaz de alocar, de forma automatizada, LSPs dispostos de forma hierárquica na rede, aproveitando a capacidade de *grooming* oferecida pela tecnologia de transporte.

No capítulo 4 é abordada a implementação do plano de controle no simulador OMNeT++, utilizado para validar as propostas desenvolvidas.

No capítulo 5 são apresentados os principais resultados obtidos e a validação do plano de controle proposto por meio de dois cenários de teste.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões desta dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo visa abordar os principais conceitos e tecnologias utilizadas para o desenvolvimento desta dissertação. Dentre elas, o conceito de redes ópticas de transporte (OTN) e sua arquitetura de camadas, o equipamento *OTNSwitch*, e o conceito de plano de controle para redes ópticas e seus principais requisitos.

2.1 REDES ÓPTICAS DE TRANSPORTE

Inicialmente, sistemas de comunicações ópticas eram utilizados apenas como meio de transmissão (camada física), devido ao fato da fibra proporcionar um meio físico com baixa taxa de erro de *bit* (BER - *Bit Error Rate*) durante a transmissão de grande capacidade de dados em enlaces ponto-a-ponto, em relação ao meio de transmissão tradicional, em cabos metálicos. Ao final de cada enlace, o sinal sofria uma conversão O-E-O (Óptico-Elétrico-Óptico), e todo o processamento do sinal pela rede, como comutação e outras funções que demandavam processamento eram realizadas eletronicamente. Segundo (Ramaswami, Sivarajan, & Sasaki, 2010), redes com essa característica arquitetural pertencem à primeira geração de redes ópticas. Como exemplo, podem ser citadas as redes baseadas em interfaces SONET/SDH, utilizada mundialmente nas décadas de 80, 90 e início dos anos 2000.

A evolução tecnológica de componentes eletrônicos e ópticos direcionou uma significativa evolução nas redes ópticas, permitindo que a demanda crescente de dados, não só de voz, como na década de 80, mas também tráfegos multimídia fossem atendidos. A fibra óptica pôde ser melhor aproveitada com a introdução da multiplexação de comprimento de onda WDM, permitindo um melhor aproveitamento do espectro de transmissão, aumentando a capacidade da rede, sem a adição de fibras. Equipamentos passaram a realizar funções mais inteligentes, realizando roteamento, comutação, monitoramento e gerenciamento em nível óptico. Tais características de evolução são definidas como segunda geração de redes ópticas.

Nesse contexto, surgiu o conceito de redes ópticas de transporte (OTN – *Optical Transport Network*), que foi projetada unindo as principais características das interfaces SONET/SDH com sistemas de transmissão ópticos WDM. A ITU-T descreve a arquitetura OTN em uma série de recomendações, onde especifica taxas de transmissão ponto-a-ponto, ponto-multiponto, unidirecional e bidirecional de até 100Gbps por canal óptico.

Segundo (ITU-T, 2010), uma rede OTN é formada por um conjunto de equipamentos ópticos: multiplexadores WDM, amplificadores ópticos, multiplexadores de *Add/Drop* reconfiguráveis (ROADM – *Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer*), Comutadores ópticos (OXC – *Optical Crossconnects*), dentre outros, conectados por fibras ópticas. Esse sistema é capaz de prover facilidade de transporte, multiplexação, roteamento, gerenciamento, supervisão e sobrevivência dos canais ópticos que transportam o sinal cliente.

O sinal cliente é transportado de forma independente de suas características específicas, ou seja, a rede OTN é capaz de operar com suas funções independentes da característica do sinal cliente a ser transportado. Assim, ela é capaz de transportar uma vasta possibilidade de tipos de sinais clientes, a citar: PSTN (*Public Switching Telephone Network*), ISDN (*Integrated Services Digital Network*), voz e dados móveis através de várias tecnologias de pacotes (ATM, *Frame Relay*, IP, MPLS e *Ethernet*) sem que sejam necessárias alterações na tecnologia de transporte.

2.1.1 Organização em Camadas

A organização em camadas apresentada para OTN não deve ser confundida com as camadas do tradicional modelo de redes, o modelo de referência OSI (*Open System Interconnection*). Uma camada OSI oferece um determinado serviço utilizando um protocolo, dentre um conjunto de protocolos possíveis. A organização de camadas que a arquitetura OTN apresenta, oferece sempre o mesmo serviço, utilizando um protocolo específico, a informação característica.

Segundo (ITU-T, 2010), dividir a arquitetura da rede em camadas cria um número independente de camadas de transporte. Passa-se a existir uma relação de cliente/servidor entre as camadas, onde o cliente se refere ao sinal cliente a ser transmitido, enquanto o servidor se refere à camada que realiza o transporte do sinal cliente. O paradigma cliente/servidor pode apresentar recursividade, pois uma camada servidora pode ser uma camada cliente para outra camada servidora. Uma característica importante do modelo de camadas cliente/servidor é a independência da relação, permitindo que o planejamento, operação e manutenção da camada servidora sejam independentes da camada cliente.

O transporte das informações em uma camada é feito através das trilhas e conexões, onde as conexões são responsáveis por efetivamente transferir os dados, enquanto a trilha é responsável por monitorar as conexões no início e no fim do caminho (Figura 2-1).

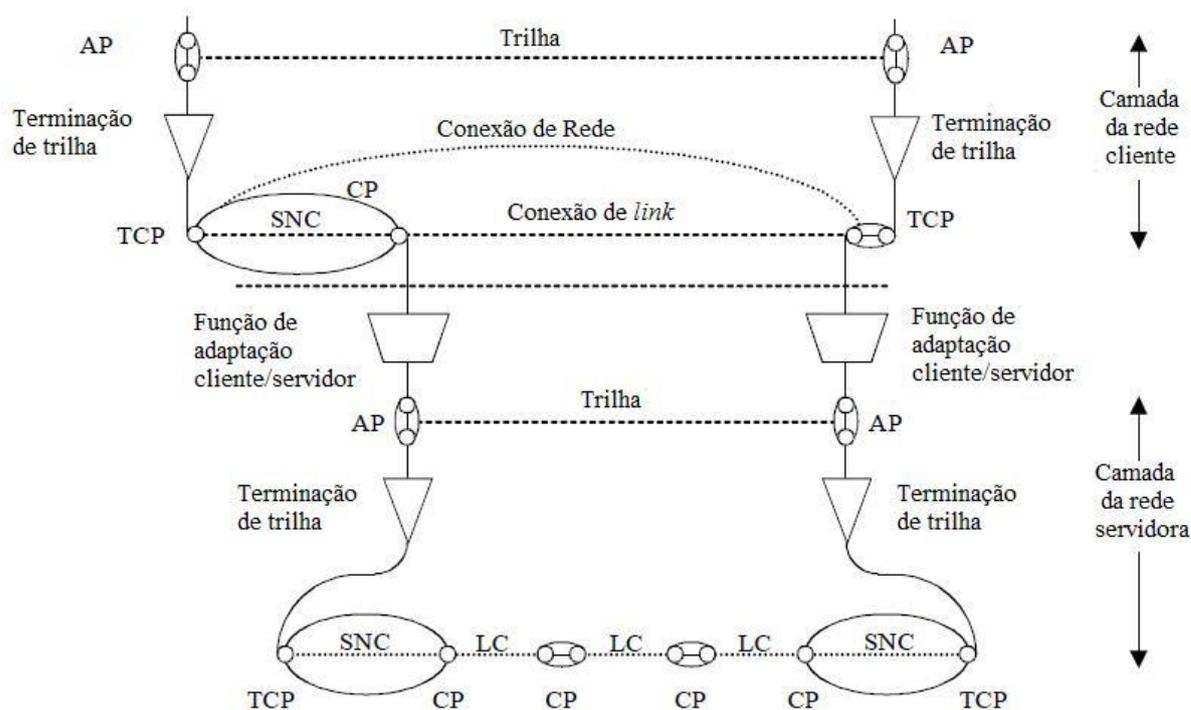


Figura 2-1 - Exemplo de modelagem funcional utilizando elementos da recomendação. (ITU-T, 2000)

A ligação entre dois componentes da rede origina um ponto de referência (RP – *Reference Point*). São exemplos de pontos de referência: ponto de acesso (AP – *Access Point*), ponto de conexão (CP – *Connection Point*), ponto de terminação de conexão (TCP – *Termination Connection Point*), etc.

Informações que trafegam pela rede, dependendo de sua origem ou destino, recebem diferentes nomes como: informações características, informações adaptadas ou informações de gerenciamento.

A Figura 2-1 mostra um exemplo de como esses componentes descritos são relacionados em uma modelagem funcional de uma rede de transporte. Além dos componentes citados, existem outros, como conexões de rede e de subrede, conexões de *link*, e, uma análise mais aprofundada sobre esses componentes e seu funcionamento, pode ser encontrada na própria recomendação ITU-T G.805 (ITU-T, 2000) e em (Barcelos, 2011).

Baseada na metodologia de modelagem descrita em (ITU-T, 2000), na recomendação ITU-T G.872 (ITU-T, 2012) é descrita a arquitetura OTN. De acordo com (Iniewski, McCrosky, & Minoli, 2008), redes OTN definem duas hierarquias: óptica e digital. A hierarquia óptica (OTH – *Optical Transport Hierarchy*) dá suporte a conexões em três níveis: canais ópticos, seções de multiplexação ópticas e seções de transmissão:

- *Optical Channel Layer* (OCH): Fornece um caminho óptico para transporte do sinal cliente. O caminho é mapeado em um comprimento de onda numa fibra, presente entre duas terminações ópticas, que são responsáveis por fazer as conversões elétricas-ópticas (origem) e ópticas-elétricas (destino).
- *Optical Multiplex Sections* (OMS): A OMS fornece as funcionalidades de multiplexar/demultiplexar comprimentos de ondas dentro de uma fibra, cada um transportando um OCH.
- *Optical Transport Section* (OTS): É o nível mais baixo de um enlace OTN. A OTS define uma interface física que detalha parâmetros da transmissão óptica, como comprimento de onda e intensidade de potência. Além disso, ela é responsável por gerar o canal de supervisão e transmiti-lo juntamente com o sinal multiplexado proveniente da camada OMS. O canal de supervisão transporta o cabeçalho proveniente das outras camadas de forma separada do *payload* de dados, ou seja, em um canal separado.

A hierarquia digital (DTH – *Digital Transport Hierarchy*) é formada por três camadas, que, na prática, são subcamadas da camada OCH, (Iniewski, McCrosky, & Minoli, 2008):

- *Optical Channel Payload Unit (OPU)*: Aplica uma técnica específica de mapeamento sobre o sinal cliente, promovendo o encapsulamento e efetuando as devidas justificações do sinal.
- *Optical Channel Data Unit (ODU)*: Insere funcionalidades formando um caminho digital para o cliente. Composta por um cabeçalho que proporciona monitoramento de desempenho, monitoramento de TCM (*Tandem Connection Monitoring*) e controle de proteção.
- *Optical Channel Transport Unit (OTU)*: Inclui código de correção de erros (FEC) e provê o alinhamento de quadros.

A Figura 2-2 ilustra a estrutura em camadas OTN e o fluxo de informação entre elas.

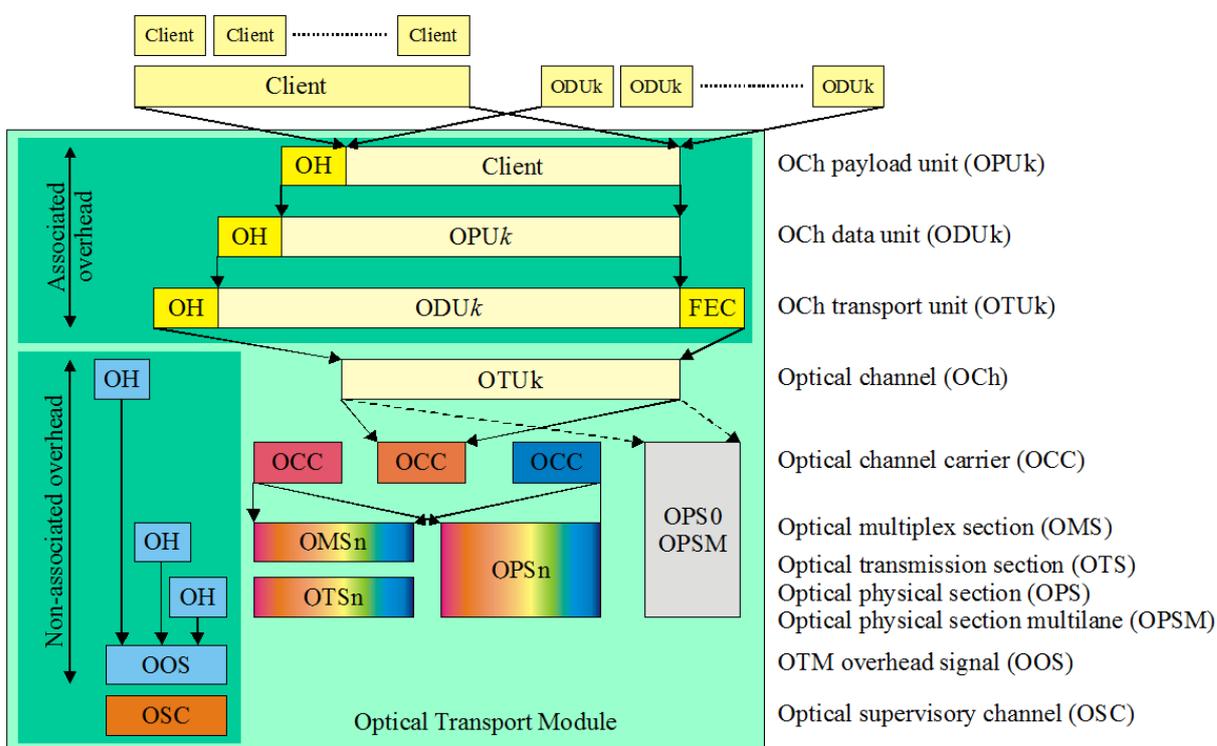


Figura 2-2 - Fluxo de informação em uma rede OTN. (ITU-T, 2010)

O caractere “k” em frente ao nome das camadas digitais (exemplo: ODU_k) representa as diferentes taxas de transmissão suportadas; e o uso do o caractere “n” nas camadas ópticas, representa o número de comprimentos de onda transportados.

Esses dois caracteres estão relacionados com o sinal resultante transportado pela fibra óptica, o Módulo de Transporte Óptico (OTM – *Optical Transport Module*), estrutura de informação utilizada pelas interfaces ópticas da OTN. Por exemplo, um OTM-16.2 significa que há dezesseis comprimentos de onda de 10Gbps, enquanto um OTM-0.1 significa que há um único comprimento de onda de 2,5Gbps.

2.1.2 Multiplexação e Comutação nos Domínios Óptico e Elétrico

Quanto mais próximo dos limites com os usuários finais de uma infraestrutura de rede de telecomunicações, tornam-se mais comuns meios de transmissão de mais baixa taxa, como, por exemplo, cabo de par trançado, transportando um único sinal cliente. Entretanto, como vários sinais clientes estão trafegando pelo mesmo caminho, torna-se mais eficiente combiná-los em um mecanismo comum de transporte.

A OTN suporta a combinação de sinais de taxa mais baixa, unindo-os em sinais taxa mais elevada, utilizando para isso diferentes formas de multiplexação. Esses esquemas de multiplexação permitem que o operador da rede se preocupe apenas com o transporte de um único sinal, potencialmente constituído por muitos sinais cliente, facilitando a administração, controle e gerenciamento da rede.

Contanto que o sinal OTN seja entregue a seu destino sem erros, pode-se ter a certeza de que os sinais individuais de cada cliente contidos no sinal combinado também são entregues sem erro, eliminando a necessidade de supervisão individual de cada sinal cliente de baixa taxa (ITU-T, 2010).

É interessante considerar uma analogia que ajuda a exemplificar o conceito apresentado no parágrafo anterior. Considere um produto que é embalado individualmente para exposição e venda em uma loja de varejo. Esse produto pode ser empacotado junto com outros semelhantes em caixas de distribuição até chegar às lojas. Essas caixas podem ser carregadas em contêineres em vagões de trem ou em aviões. Dessa forma, a empresa de transporte só precisa monitorar os trens ou os aviões para garantir que os produtos individuais sejam devidamente transportados. O quadro OTN é utilizado de maneira muito semelhante, servindo de

container para diferentes tipos de sinais, que podem ser transportados de um ponto a outro, sem a necessidade de monitoramento individual durante toda a rota. A estrutura de quadro OTN é, em muitos aspectos, semelhante ao container da empresa de transporte e as formas de embalagem dos pacotes individuais nos containers são, em muitos aspectos, como os esquemas de multiplexação. Nessa analogia, o cabeçalho de transporte óptico é equivalente à informação de logística dos containers, informando seu conteúdo e suas características (Garcia, Bueloni, Tessinari, & Farias, 2013).

Grande parte dos sistemas modernos baseados em redes de fibras ópticas é capaz de transmitir a taxas de várias dezenas de Gbps. Como consequência, para utilizar totalmente a capacidade do sistema, é necessário transmitir vários canais simultaneamente sobre a mesma fibra óptica. A OTN suporta dois métodos de multiplexação, por divisão de frequência (FDM - *Frequency Division Multiplexing*) ou por divisão de tempo (TDM - *Time Division Multiplexing*). No caso da TDM, os bits associados a diferentes canais são intercalados no domínio do tempo para formar um fluxo de bits alternado. Observando a Figura 2-3, percebe-se que cinco canais são transmitidos compartilhando o mesmo meio, cada qual com uma “janela” de tempo de $3\mu\text{s}$.

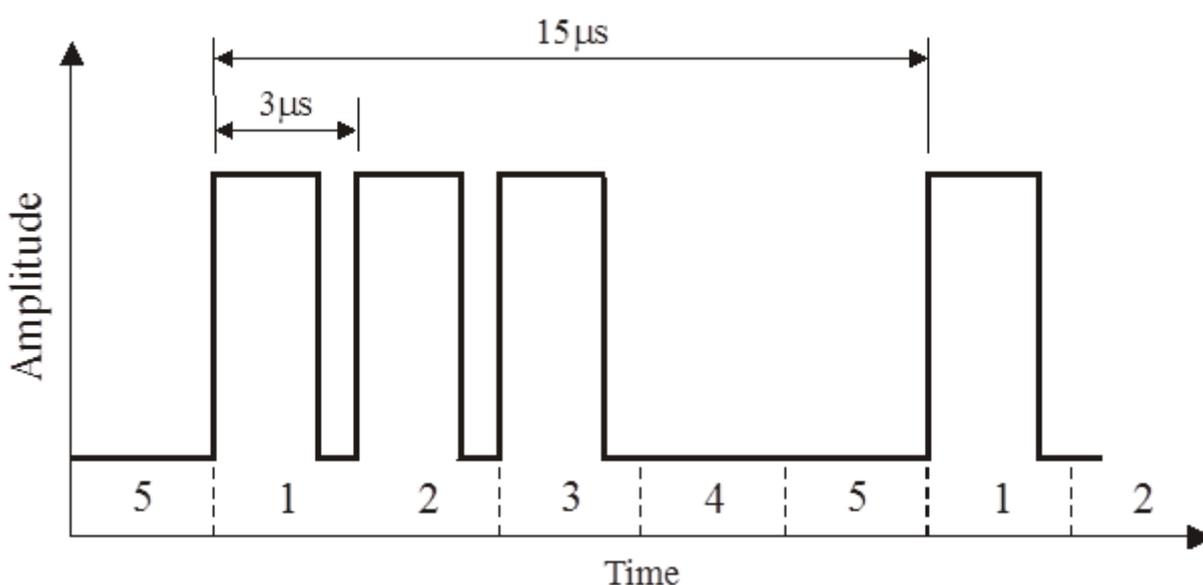


Figura 2-3 - Multiplexação TDM. (ITU-T, 2010)

Já na multiplexação FDM, os canais são espaçados no domínio da frequência, sendo transmitidos simultaneamente (Figura 2-4). A multiplexação FDM é utilizada

no domínio óptico, no qual passa a ser chamada de multiplexação por divisão de comprimento de onda WDM.

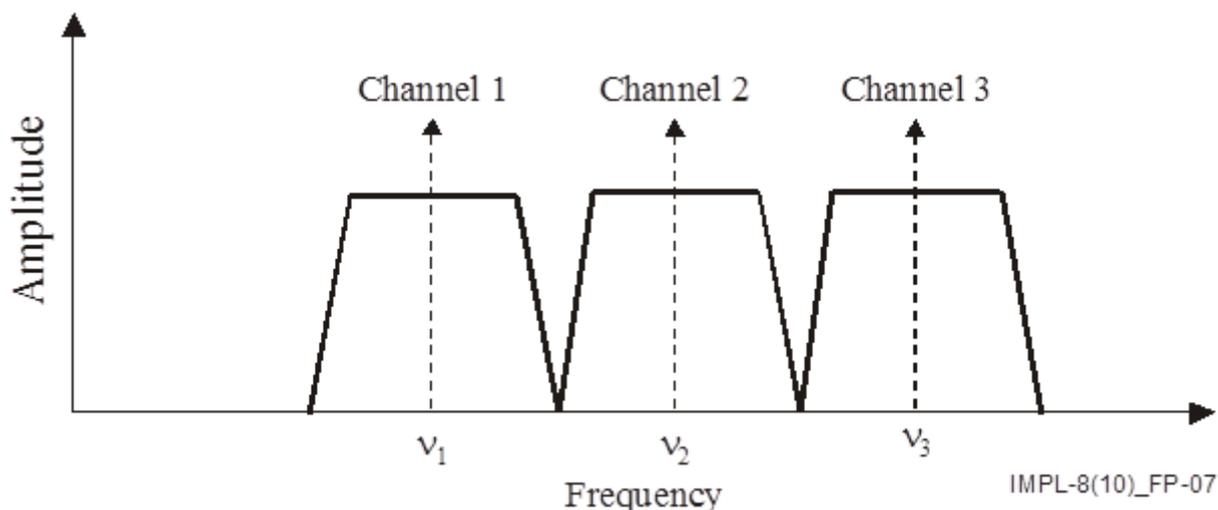


Figura 2-4 - Multiplexação FDM.

A multiplexação TDM é aplicada no domínio elétrico OTN, utilizado para aumentar a eficiência e utilização dos canais ópticos, tendo em vista que normalmente o número de canais ópticos é bem restrito e sua capacidade é elevada (já existem protótipos de 100Gbps por canal óptico). A OTN suporta a multiplexação de sinais ODUk. Dessa forma, dois sinais ODU0 podem ser multiplexados em um sinal ODU1, quatro sinais ODU1 (2,5Gbps) podem ser multiplexados em um sinal ODU2 (10Gbps), assim quatro sinais ODU2 podem ser multiplexados em uma ODU3, ou 40 ODU1 podem ser combinados em uma ODU4 (100Gbps). Além dos sinais ODU de taxa fixa, a OTN possui a ODUflex, que tem sua taxa ajustada de acordo com a taxa do sinal cliente. Qualquer outra combinação de sinais pode ser realizada, desde que sejam respeitadas as taxas, ex.: não é possível multiplexar três ODU3 (40Gbps cada) em uma ODU4 (100Gbps). A Figura 2-5 ilustra algumas das possibilidades de multiplexação de sinais, formando OTUs 1, 2 e 3.

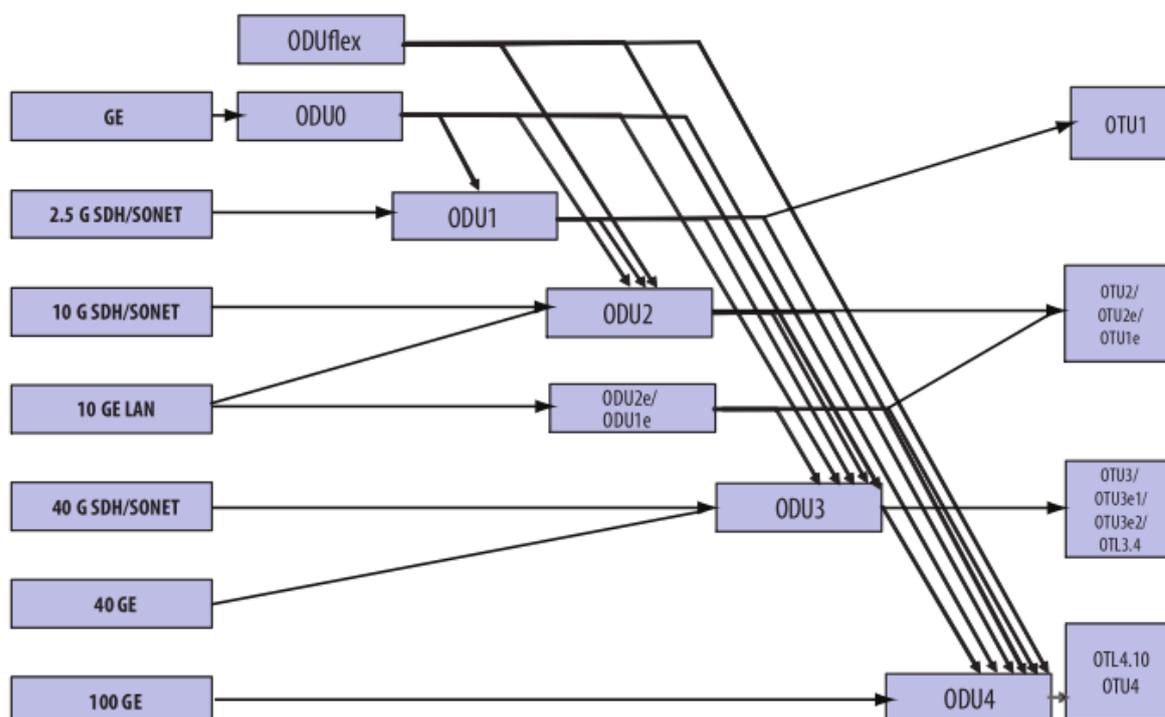


Figura 2-5 - Multiplexação de ODUs em redes OTN. (Vaez-Ghaemi, 2010)

Assim como a multiplexação, na OTN é disponibilizada a comutação de sinais nos domínios óptico e elétrico. A comutação no nível óptico ocorre na camada OCH. Os sinais são direcionados sem a necessidade de conversão Óptico-Elétrica, em equipamentos como ROADM, OXC e WSS (*Wavelength Selective Switching*). A comutação no domínio elétrico ocorre na camada ODUk, em uma matriz de conexão que estabelece ligações entre diferentes portas de um equipamento.

A comutação dos sinais elétricos e ópticos é de extrema importância para o plano de controle OTN, possibilitando o estabelecimento de LSPs, artifício utilizado pelo plano de controle no roteamento e proteção dos sinais clientes.

2.2 OTNSWITCH: ARQUITETURA

O *OTNSwitch* é um equipamento OTN que surge diante da necessidade do aumento da demanda e prove recurso de transporte para diversas tecnologias, formando um núcleo de rede único e padronizado.

Baseado na padronização da tecnologia OTN, o *OTNSwitch* é um equipamento que explora toda a flexibilidade e dinamicidade que o padrão OTN oferece, aliando toda sua capacidade de comutação e multiplexação de sinais ópticos (OCH) e elétrico (ODU). Sua arquitetura abrange desde a adaptação do sinal cliente à saída do sinal óptico modulado e amplificado, pronto para ser transmitido na fibra.

A arquitetura assumida nesta dissertação foi desenvolvida no mesmo projeto de pesquisa em que esta dissertação está inserida, e sua descrição referencial pode ser encontrada em (Dilem, Favoreto, Tessinari, Bueloni, & Garcia, 2013) e (Dilem M. B., 2014).

2.2.1 Descrição da Arquitetura

A arquitetura proposta em (Dilem, Favoreto, Tessinari, Bueloni, & Garcia, 2013) e (Dilem M. B., 2014), divide o equipamento em seis módulos que desempenham o processamento e tratamento do sinal a ser transportado, de acordo com as recomendações G.709 (ITU-T, 2012) e G.798 (ITU-T, 2013). Cada módulo é composto por uma ou mais camadas OTN, e a conexão dos módulos no *OTNSwitch* respeita a hierarquia cliente-servidor, descrita em 2.1.1. Os módulos foram concebidos para assumir o formato de placas plugáveis, onde o equipamento pode ser montado de acordo com a necessidade do elemento de rede, ou seja, quantidade de clientes, capacidade máxima de multiplexação, capacidade de comutação e interfaces ópticas necessárias. A Figura 2-6 ilustra a arquitetura proposta em (Dilem, Favoreto, Tessinari, Bueloni, & Garcia, 2013).

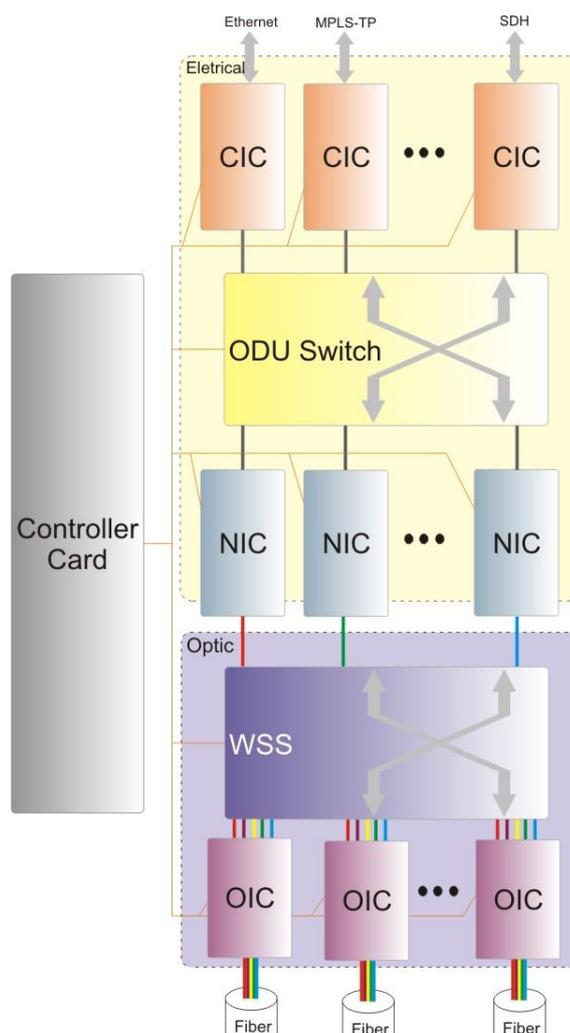


Figura 2-6 - Arquitetura OTNSwitch. (Dilem, Favoreto, Tessinari, Bueloni, & Garcia, 2013)

O módulo CIC (*Client Interface Card*) desempenha as funções de adaptar/recuperar o sinal cliente ingressando/saindo da rede de núcleo OTN e realizar as devidas justificações sobre o sinal. Diante da flexibilidade de mapeamento do sinal cliente oferecida pela OTN, o *OTNSwitch*, através do CIC, é capaz de transportar sinais do tipo 10G – 100G *Ethernet*, *MPLS*, *Fiber Channel*, *SONET/SDH* e até mesmo os próprios sinais OTN de taxas menores.

O módulo *ODU Switch*, realiza a função de comutar os sinais ODU no *OTNSwitch*. Corresponde ao primeiro nível de comutação do equipamento, a comutação elétrica. A comutação é realizada por uma matriz de comutação, onde a matriz pode ser configurada diretamente pelo operador de rede, mediante comandos pelo sistema de gerência de rede, ou por um plano de controle que executa seus protocolos sobre a rede, reservando capacidade de comutação nos equipamentos ao longo de um caminho. O *ODU Switch* também realiza a proteção de sinais ODU, através do

protocolo APS (*Automatic Protection Switch*), descrito na recomendação G.808.1 (ITU-T, 2010).

O módulo NIC (*Network Interface Card*) é responsável pelo monitoramento do caminho fim-a-fim no domínio elétrico, através da camada ODU, e trecho-a-trecho, através da camada OTU. Também é no NIC que o FEC atua, recuperando potenciais degradações de sinal, quando possível de recuperação. Outra funcionalidade importante do NIC é o primeiro estágio de multiplexação, a multiplexação TDM que atua sobre quadros ODU, permitindo que sinais ODU de baixa ordem sejam transmitidos em um sinal ODU de alta ordem, de acordo com a hierarquia de multiplexação de sinais ODU apresentado em 2.1.2. É importante salientar que é no NIC que ocorre a conversão de sinal elétrico para óptico, já modulado em um comprimento de onda.

O segundo nível de comutação no *OTNSwitch* ocorre no módulo WSS. Composto pela matriz de comutação óptica, é capaz de comutar comprimento de onda entre suas interfaces. Assim como o *ODU Switch*, sua matriz pode ser configurada mediante o sistema de gerência ou pelo plano de controle.

O módulo OIC (*Optical Interface Card*), por sua vez, realiza a multiplexação de sinais ópticos em uma fibra através de WDM, e prepara o sinal para ser transmitido, amplificando e compensando dispersão, por exemplo.

O módulo *Controller Card* realiza as funções de gerenciamento do equipamento (EMF – *Equipment Management Function*) e comunicação (MCF – *Message Communication Function*) com os planos de gerência, controle e com a rede de comunicação de dados (DCN – *Data Communication Network*). Sua composição é uma arquitetura a parte, e uma maior atenção a ela é dada na próxima seção devido a sua importância no relacionamento com o trabalho desenvolvido nesta dissertação.

A arquitetura do equipamento *OTNSwitch* é complexa, não faz parte do escopo desta dissertação sua descrição detalhada. O detalhamento completo da arquitetura pode ser encontrado em (Dilem, Favoreto, Tessinari, Bueloni, & Garcia, 2013) e (Dilem M. B., 2014).

2.2.2 Gerenciamento do Equipamento

O *OTNSwitch* é um equipamento que incorpora todos os aspectos da tecnologia OTN, por isso, é um equipamento que apresenta muitas funcionalidades do ponto de vista de gerenciamento de sinais clientes, conexões e caminhos. Gerenciar um equipamento de tal porte não é um processo simples, e para suprir essa demanda a ITU-T descreve um conjunto de recomendações relativas a aspectos de gerência de redes, mais especificamente, gerência de redes OTN. Dentre as recomendações, destacam-se a G.874 (ITU-T, 2010) e a G.7710 (ITU-T, 2012). A recomendação ITU-T G.874 estabelece os aspectos de gerência de redes OTN, especificando as funções de gerenciamento, como gerenciamento de falhas, desempenho, configuração, entre outras. Já a recomendação ITU-T G.7710 descreve a arquitetura do sistema de gerenciamento embarcado no equipamento.

A Figura 2-7 ilustra a arquitetura de gerência do equipamento padronizada pela ITU-T na recomendação G.7710. A arquitetura se decompõe em dois principais blocos, a função de gerenciamento do equipamento (EMF – *Equipment Management Function*) e a função de comunicação de mensagem (MCF – *Message Communication Function*).

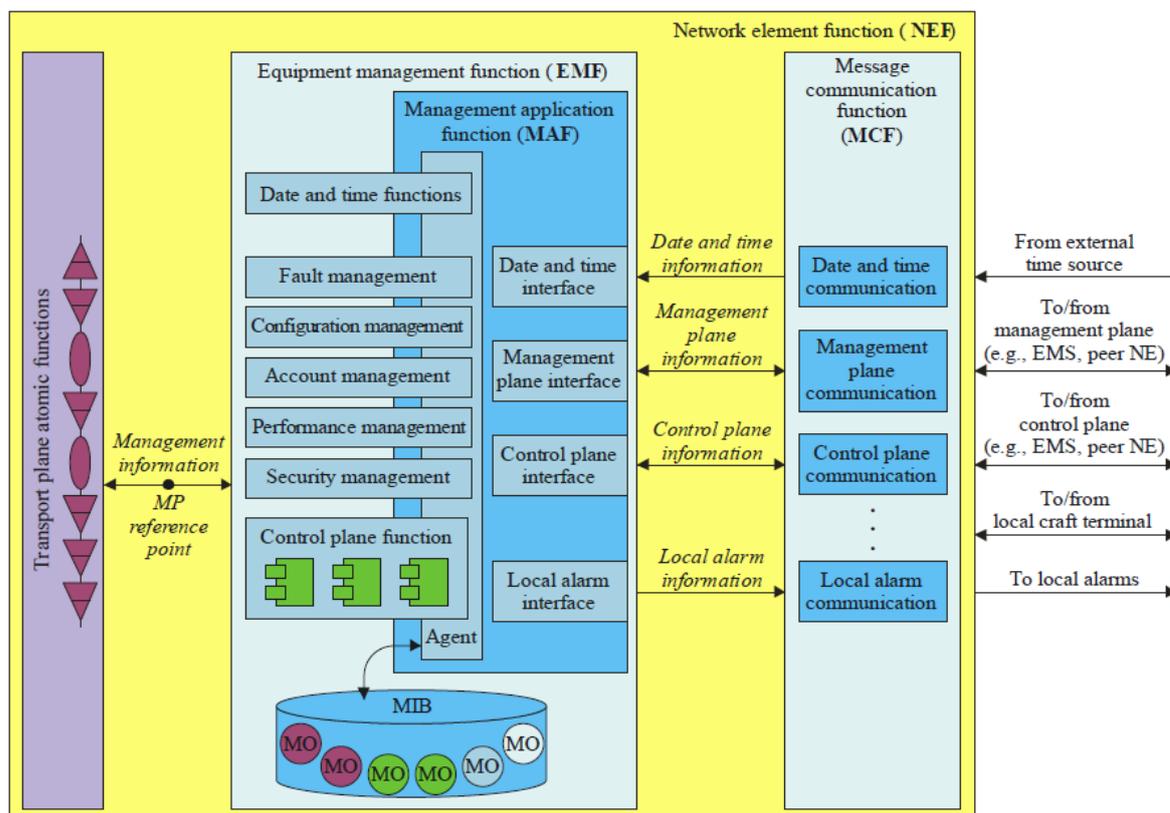


Figura 2-7 - Arquitetura de gerência. (ITU-T, 2012)

O EMF é composto por várias funções, como pode ser observado na Figura 2-7, denominadas *data and time*, FCAPS (*Fault, Configuration, Accounting, Performance and Security*) e plano de controle. Resumidamente, cada funcionalidade pode ser definida como:

- **Data e hora:** realiza o ajuste de data e hora, que são utilizados nas FCAPS que utilizam essa informação, *time-stamp* de eventos, por exemplo;
- **Gerência de falhas:** conjunto de funções com a finalidade de detectar, isolar e corrigir anomalias de funcionamento na rede;
- **Gerência de configuração:** conjunto de funções responsáveis por planejamento de rede e engenharia, instalação, planejamento e negociação de serviço, provisionamento, *status* e controle do equipamento;
- **Gerência de desempenho:** conjunto de funções que trata do monitoramento e gerenciamento de parâmetros que medem o desempenho da rede;
- **Gerência de segurança:** conjunto de funções responsáveis pela integridade, autenticidade e a disponibilidade das informações e recursos da rede, mantendo o controle dos registros de acessos aos recursos e informações importantes e confidenciais em uma rede.

- **Plano de controle:** realiza as funções de plano de controle do equipamento pela troca de mensagens dos protocolos que implementam o plano de controle.

O MCF disponibiliza interfaces responsáveis pela comunicação de informações relativas ao gerenciamento de cada equipamento na rede, com outros equipamentos ou sistemas. Dentre as informações trocadas entre o sistema de gerenciamento de cada equipamento encontram-se mensagens de plano de controle, data e hora, alarmes, etc.

O sistema de gerenciamento aqui exposto apresenta relação com o plano de controle desenvolvido nesta dissertação, principalmente a própria função de plano de controle e gerência de configuração, além das interfaces do MCF. Todo acesso a qualquer tipo de informação do equipamento ou configuração deve ser realizado pela arquitetura de gerência aqui apresentada. Detalhes dessa relação são explicados no Capítulo 3, onde a arquitetura de plano de controle desenvolvida é apresentada.

Não é objetivo desta dissertação desenvolver um sistema de gerenciamento. A arquitetura de gerenciamento desenvolvida para o *OTNSwitch* é melhor detalhada em (Favoreto R. C., 2014), trabalho que se encontra inserido no mesmo projeto de pesquisa em que esta dissertação foi desenvolvida.

2.3 PLANO DE CONTROLE PARA REDES ÓPTICAS

No início da década de 90, todas as configurações e aprovisionamentos eram realizados por um sistema de gerenciamento centralizado, sendo comum a ocorrência de erros na operação de redes de telecomunicações. Cada nova geração de equipamentos, resultante da evolução da tecnologia, trouxe facilidades e capacidades de diminuir operações de configuração manual, aumentando o grau de automatização de processos. Porém, as configurações eram estáticas, tornando as redes com baixa flexibilidade diante da crescente demanda de serviço.

Estímulos causados por uma crescente demanda de banda, impulsionaram a busca por soluções capazes de responder às requisições de serviço sob demanda. O interesse por mais dinamicidade, capacidade de configuração em redes de transporte e capacidade de realizar conexões de forma automática desenvolveram o paradigma de plano de controle.

Segundo (Farrel & Bryskin, 2006), o plano de controle tem como função permitir que o plano de transporte seja capaz de lidar com o tráfego de dados de forma eficiente e inteligente. Através de troca de informação de controle, ele é capaz de desempenhar atividades como: roteamento, alocação de recursos, proteção e restauração, dentre outras, proporcionando um nível parcial, ou até mesmo total, de automação de processos na rede. A Figura 2-8 ilustra um equipamento de rede dotado de funcionalidades de plano de controle onde, pela troca de mensagens, o plano de controle realiza suas funções, configurando o plano de transporte para que o tráfego flua pela rede da forma determinada pelos seus protocolos e algoritmos.

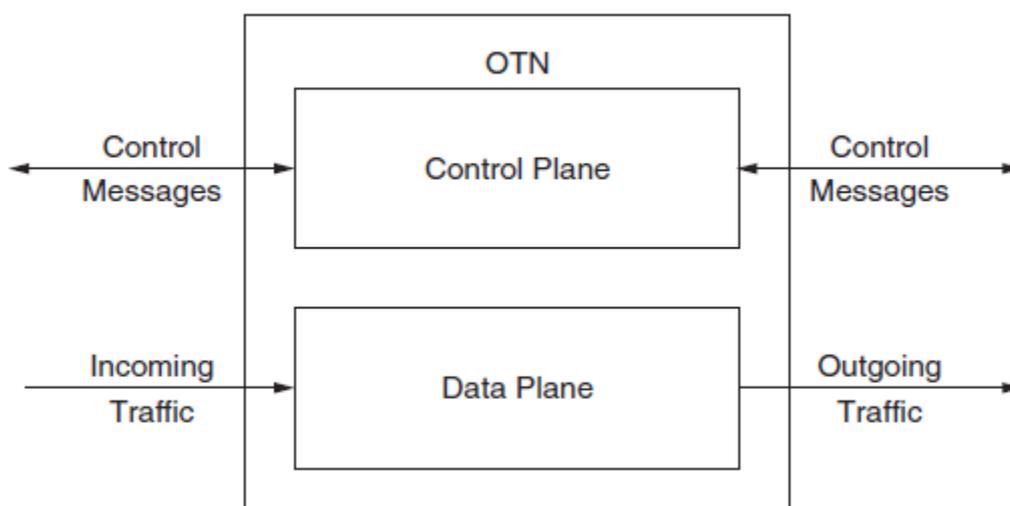


Figura 2-8 - Equipamento OTN com funcionalidade de plano de controle. (Iniewski, McCrosky, & Minoli, 2008)

2.3.1 Requisitos de Plano de Controle para Redes Ópticas de Nova Geração

Na camada de transporte, as redes ópticas, mais especificamente as redes OTN, foram desenvolvidas para estabelecer um caminho utilizado pela camada IP (Figura 2-9). Na primeira etapa de desenvolvimento o plano de controle não é exigido, pois

os caminhos ópticos são configurados manualmente e são estáticos, fornecendo uma estrutura engessada, sem muito a oferecer em termos de serviços e funcionalidades aos seus clientes.

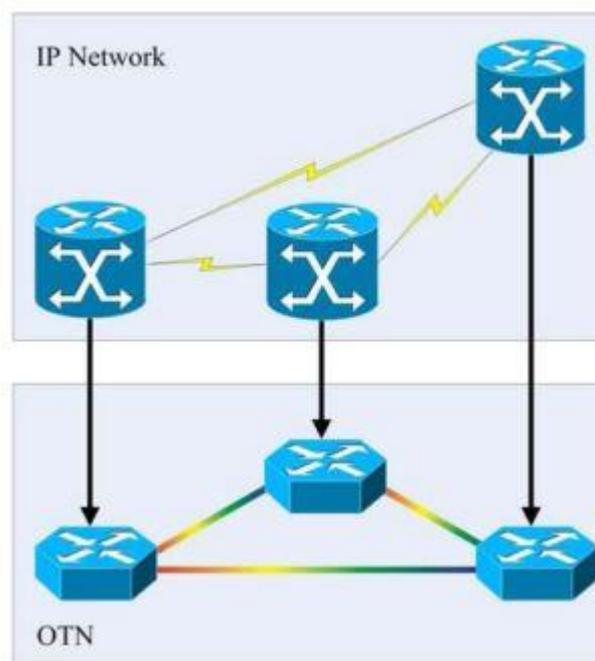


Figura 2-9 - IP sobre OTN. (Chen, 2006)

Posteriormente, com o avanço da tecnologia de redes ópticas, equipamentos como os **Multiplexadores Reconfiguráveis de Add/Drop** (ROADM – *Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer*) e **Crossconnects ópticos** (OXC – *Optical Crossconnects*) inseriram um grau de flexibilidade na rede de transporte, tornando o uso de IP sobre OTN mais interessante. Nessa fase de desenvolvimento, o tráfego IP é convertido em sinal óptico WDM nos pontos de agregação e passa a ser comutado dinamicamente dentre os comprimentos de onda disponíveis na rede, onde o comprimento de onda a ser utilizado é definido de acordo com a classe de serviço. Assim, os tráfegos de serviços de mesma categoria são roteados e comutados no domínio óptico de forma mais rápida e eficiente (Chen, 2006).

A próxima geração de redes caminha para o provimento de serviços de dados, voz, vídeos e imagens, exigindo assim soluções cada vez mais flexíveis e dinâmicas no que diz respeito à configuração de conexões, roteamento, reserva de banda e eficiência no gerenciamento dos recursos disponíveis na camada de transporte.

Nesse cenário, o plano de controle deve ser capaz de lidar com vários requisitos de qualidade de serviço (QoS) e restrições para alcançar a dinamicidade exigida pelas aplicações. Arquiteturas baseadas em serviços diferenciados (*Diffserv*) são vistas como as melhores abordagens de solução, cabendo ao plano de controle assegurar que o núcleo da rede esteja devidamente preparado para receber e tratar os diversos serviços ativos na rede.

Como exposto no Capítulo 1, o futuro das redes ópticas caminha no sentido de ser altamente gerenciável e configurável, alcançando a flexibilidade exigida pelos seus clientes e aplicações. O avanço da tecnologia de *hardware* e *software* torna cada vez mais possível estabelecer, re-rotear e finalizar conexões sem afetar outras conexões existentes na rede. Porém, a configuração da rede se torna cada vez mais complexa, com mais parâmetros a serem configurados.

A capacidade de roteamento de conexões nos equipamentos de redes de transporte é suportada com a inserção de um núcleo de comutação na camada elétrica, permitindo que o tráfego possa fazer passagem direta (*passthrough*) ou ser inserido/extraído (*Add/Drop*) para rede cliente (*Ethernet*, IP) através de conversão O-E-O (Figura 2-10). A escalabilidade do núcleo de comutação fica limitada devido ao número de comprimento de ondas nas fibras (mais de 80 por fibra), fazendo com que a matriz de comutação eletrônica deva ser extremamente rápida e complexa para suportar tamanho número e taxa das conexões. Isso torna o custo-benefício desfavorável, pois os equipamentos se tornam muito caros, dado a complexidade eletrônica. O problema pode ser contornado com técnicas de *grooming* ou substituindo o núcleo de comutação por comutadores IP, diminuindo assim a complexidade. Na camada óptica, os ROADMs realizam a comutação e multiplexação de comprimento de onda, permitindo outro nível de *grooming* e roteamento.

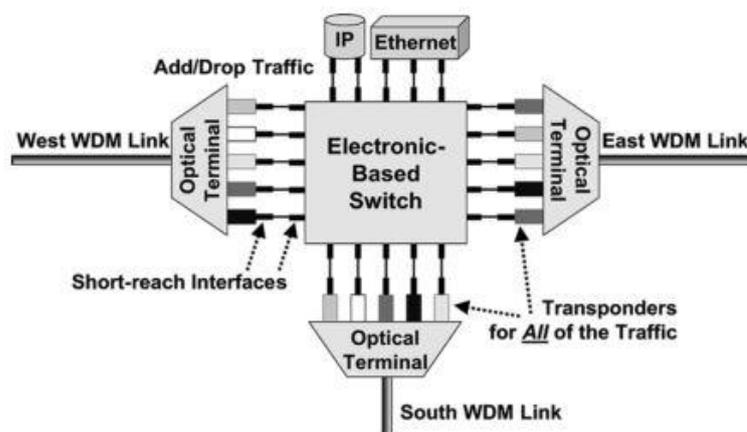


Figura 2-10 - Núcleo de comutação em equipamentos através de conversão O-E-O. (Berthold, Saleh, Blair, & Simmons, 2008)

Futuramente, as redes assumirão um modelo dinâmico onde toda a configuração será realizada de forma autônoma pelo plano de controle. As camadas superiores da rede e suas aplicações farão as requisições de serviço de transporte à camada óptica, que será configurada e reservará a banda de acordo com a requisição, provendo mecanismos de proteção e restauração para as conexões. Serviços são configurados em segundos, a resposta rápida no estabelecimento de conexão é uma necessidade para as aplicações futuras como computação distribuída, aplicações de tempo real, aplicações colaborativas, armazenamento e computação em nuvem. Torna-se caro manter conexão de todos para todos, portanto, o estabelecimento rápido de conexões é necessário para diminuir os custos de operação (Berthold, Saleh, Blair, & Simmons, 2008).

Para alcançar tais requisitos, a tecnologia OTN deve prover *grooming* de tráfego para melhor aproveitamento de comprimento de ondas, simplificando os núcleos de comutação. Na comutação óptica, tecnologias que melhoram a eficiência de espectro serão aplicadas de forma adaptativa, modificando frequência e modulação de sinais. A comutação elétrica fornece a capacidade de multiplexação e transporte em diferentes taxas, melhor utilizando a capacidade do comprimento de onda (Hu, et al., 2011).

2.3.2 GMPLS: *Generalized Multiprotocol Label Switching*

O GMPLS é um conjunto de protocolos de plano de controle padronizado pela IETF, que generaliza as funcionalidades do MPLS para suportar, não somente comutação de pacotes, mas também comutação TDM, comprimentos de onda e fibras, comutações necessárias no contexto de redes ópticas (Mannie, 2004). Para atender os requisitos de comutação em redes ópticas, o GMPLS utiliza os *generalized labels*, que contém informações que permitem a configuração de *cross* conexão, independente o tipo de comutação. O *generalized label* estende os *labels* tradicionais das tecnologias anteriores, como VCI (*Virtual Channel Identifier*) e VPI (*Virtual Path Identifier*) (ATM) e *shim header* (MPLS), permitindo a identificação de *labels* não apenas dos que são transmitidos *in-band* associados a pacotes, mas também *labels* que identificam *time slots*, comprimentos de onda ou fibras (portas), indicando recursos físicos. O GMPLS busca definir um plano de controle capaz de atender os vários tipos de tecnologias de rede (IP, ATM, SONET/SDH, TDM e WDM) permitindo configuração de chamadas fim-a-fim por redes heterogêneas.

2.3.2.1 GMPLS: *Capacidade de Comutação*

Como visto anteriormente, o GMPLS define um plano de controle que suporta comutação não apenas de pacotes, mas também realiza comutação de *time slots*, comprimento de onda e fibras. Ele pode atuar em diferentes tipos de comutadores: roteadores IP/MPLS, elementos de rede SONET/SDH, comutadores ATM e comutadores ópticos (OXC's e ROADMs). Diferentes tipos de LSR (*Label Switching Routers*) são categorizados de acordo com sua capacidade de comutação ISC (*Interface Switching Capable*), sendo dividida em cinco categorias (Maier, 2008):

- **Interfaces PSC (*Packet Switch Capable*):** Interface capaz de reconhecer pacotes e realizar o encaminhamento baseado em informações contidas nos cabeçalhos dos pacotes. Exemplos: Interfaces de roteadores IP e interfaces de roteadores MPLS;
- **Interfaces L2SC (*Layer-2 Switch Capable*):** Interfaces que reconhecem células/*frames* e são capazes de realizar a comutação baseada em

informações presentes nos cabeçalhos das células/*frames*. Exemplos: *Bridge Ethernet* e interfaces ATM;

- **Interfaces TDM (*Time-Division Multiplex Capable*):** Interface capaz de comutar *time slots*. Exemplos: Interface SONET/SDH, DSC (*Digital Cross-connect System*) ou ADM (*Add/Drop Multiplexer*);
- **Interfaces LSC (*Label Switch Capable*):** Interface capaz de realizar a comutação baseada no comprimento de onda ou grupo de comprimento de ondas (*Waveband*). Exemplos: Interface de OXC;
- **Interfaces FSC (*Fiber Switch Capable*):** Interface capaz de realizar a comutação baseada na posição física. Exemplo: Interfaces OXC que operam no nível de fibras ou múltiplas fibras.

Uma interface pode suportar um ou mais tipos de ISC. Uma interface pode, por exemplo, realizar a *cross* conexão de um comprimento de onda em outro canal óptico de saída, ou terminar o comprimento de onda e extrair um TDM e realizar a comutação do TDM de entrada em outro TDM de saída.

2.3.2.2 GMPLS: Hierarquia de LSPs

Um caminho dentro de uma rede MPLS é chamado de *Label Switched Path* (LSP), e representa uma conexão fim-a-fim entre o LER (*Label Edge Router*) de ingresso com o LER de egresso para o transporte de um sinal cliente, ou em alguns casos entre LSRs do núcleo. LER é um LSR que se inicia na borda de um domínio entre LSRs de mesma capacidade de ISC. No exemplo da Figura 2-11, são estabelecidos dois LSPs diferentes para transportar os dois fluxos, um para o transporte do IP1 e outro para o transporte do IP2.

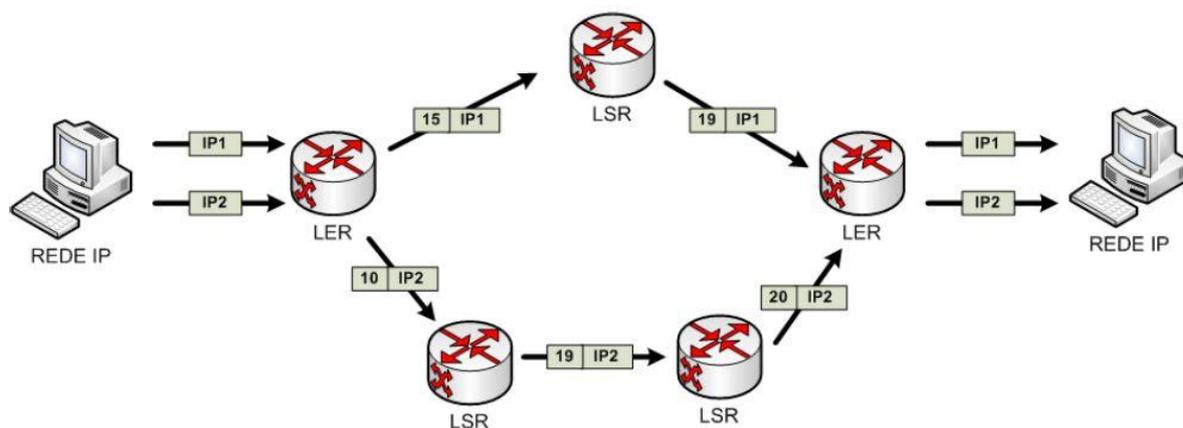


Figura 2-11 - LSPs em redes MPLS. (Favoreto F. P., 2009)

O MPLS permite que os LSPs sejam dispostos de forma hierárquica. Ele permite que um pacote marcado com um LSP seja marcado com outro LSP por outro LSR, formando uma pilha de LSPs aninhados, um encapsulado no outro.

O GMPLS estende essa noção de hierarquia de LSP. Da mesma forma que no MPLS, o aninhamento de LSPs pode ser feito na mesma ISC. Por exemplo, LSPs TDM de baixa ordem SONET/SDH podem ser aninhados em um LSP TDM de alta ordem. Porém, diferente do MPLS, o GMPLS permite aninhamentos de LSPs em diferentes ISCs. A hierarquia de LSPs no GMPLS é baseada nas diferentes capacidades de comutação. Um LSP pode ter início em uma interface PSC, e ser aninhado com um LSP L2SC que por sua vez é aninhado com outro LSP L2SC em um LSP TDM, que se encontra aninhado em um LSP LSC, que se encontra em um LSP FSC junto com outros LSPs LSCs (Figura 2-12).

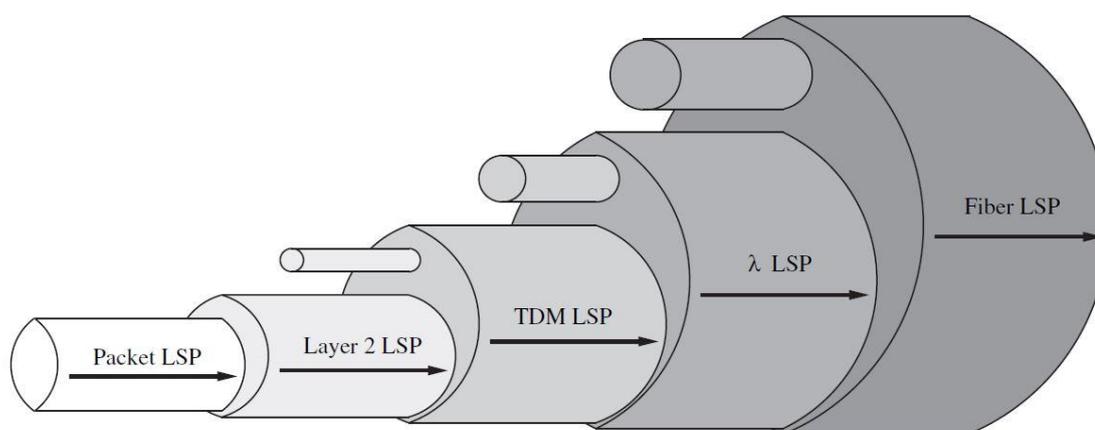


Figura 2-12 - Hierarquia de LSPs no GMPLS. (Maier, 2008)

É importante ressaltar que um LSP se inicia e termina em interfaces de mesmo ISC. Isso implica que um LSP PSC tem início e fim entre interfaces PSC, e podem ser aninhados em um LSP L2SC, e assim por diante, respeitando os níveis hierárquicos, de LSPs de baixa ordem para LSPs de alta ordem. LSPs de alta ordem servem de túnel para LSPs de baixa ordem, onde vários LSPs de baixa ordem são aninhados em um LSP de alta ordem.

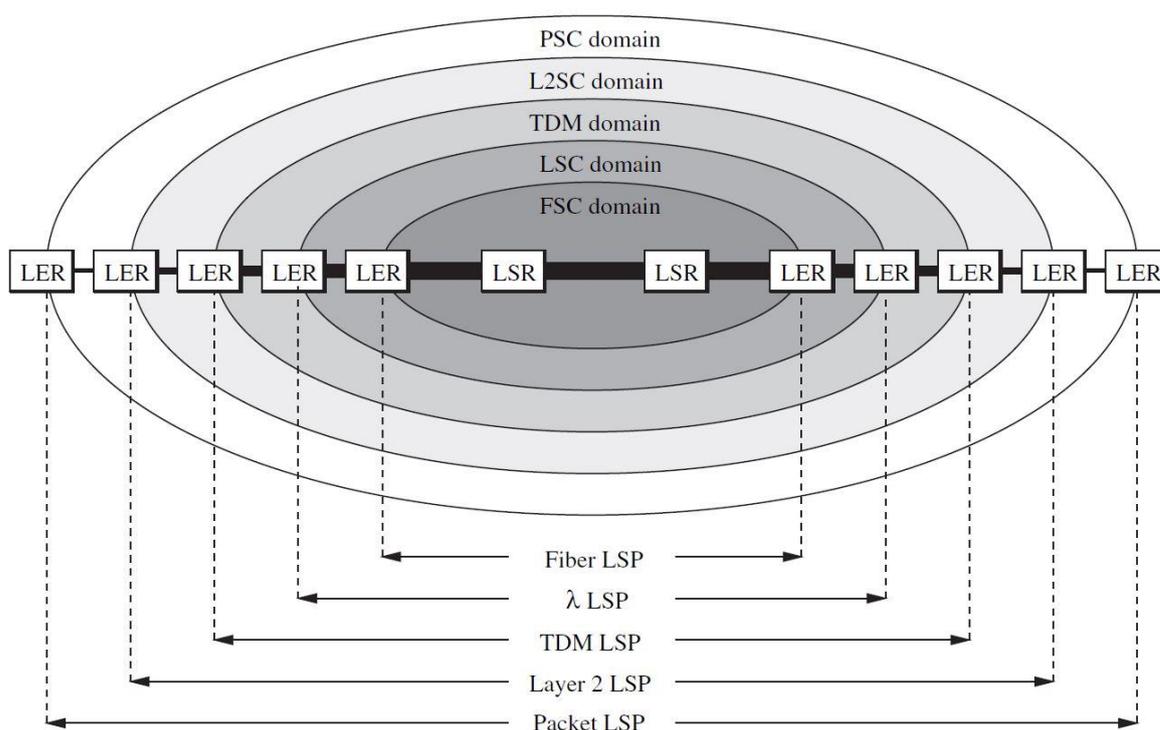


Figura 2-13 - Aninhamento de LSPs no GMPLS. (Maier, 2008)

A Figura 2-13 ilustra o aninhamento de LSPs, onde um LSP sempre inicia e termina em LERs de mesma ISC.

2.3.2.3 GMPLS: Estabelecimento de LSPs Hierárquicos

Na hierarquia de LSPs do GMPLS, LSPs de baixa ordem são aninhados em LSPs de alta ordem, portanto, o LSP de alta ordem deve ser estabelecido previamente para dar suporte aos LSPs de baixa ordem. O estabelecimento de um LSP de baixa ordem pode desencadear configurações de LSPs de alta ordem para dar suporte a ele.

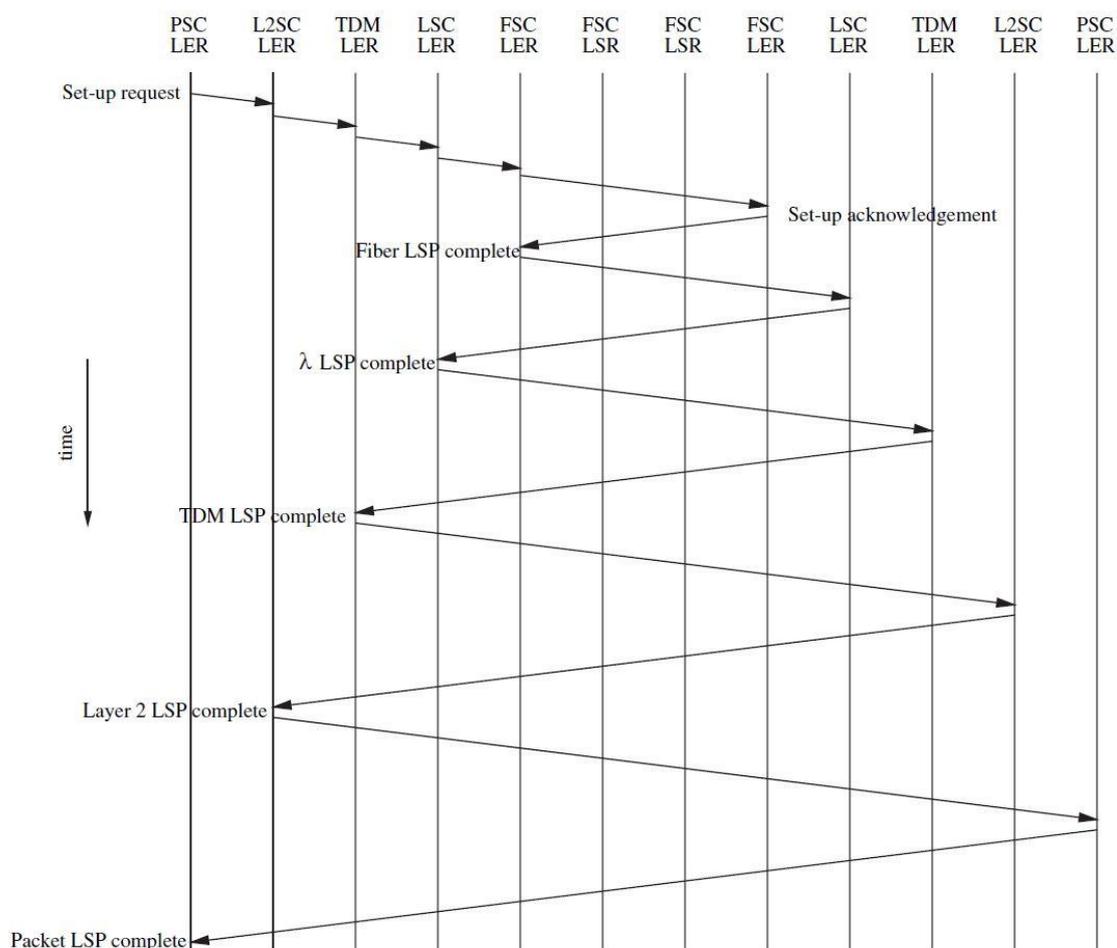


Figura 2-14 - Estabelecimento de LSPs hierárquicos no GMPLS. (Maier, 2008)

Na Figura 2-14, a rede se encontra sem nenhum LSP configurado. A requisição de um LSP PSC desencadeia o processo de estabelecimento de LSPs de alta ordem para dar suporte a ele. Ao receber a requisição de estabelecimento de LSP PSC, o LER PSC verifica que não há nenhum LSP estabelecido e faz a requisição de estabelecimento de LSP para o próximo nível na hierarquia. A requisição percorre todos os níveis e os LSPs vão sendo estabelecidos da alta ordem para a baixa ordem, como observado na linha do tempo. Quando todos os LSPs de alta ordem são estabelecidos, o LSP PSC é finalmente estabelecido.

Uma vez que um LSP é estabelecido dentro de uma camada, ele pode ser utilizado como *link* de dados pelas camadas superiores, podendo ser anunciado como um TE *link* para utilização de computação de caminhos de LSPs. Esse TE *link* é referenciado como FA-LSP (*Forward Adjacency LSP*).

2.3.2.4 GMPLS: TE Link

Com o objetivo de facilitar a operação dos algoritmos de roteamento e estabelecimento de LSP, o GMPLS utiliza o conceito de TE *link*. O GMPLS dissemina um conjunto informações de estado de enlace adicionais para esse princípio denominado TE *attributes*. As informações descrevem as propriedades de cada enlace: ISC, largura de banda disponível, largura de banda máxima, tipos de proteção/restauração e *shared risk link group* (SRGL). O SRGL representa um grupo de enlaces que compartilham risco, ou seja, que são afetados ao mesmo tempo caso um evento de falha ocorra. Um enlace juntamente com seus TE *attributes* é chamado de TE *link*.

2.3.2.5 GMPLS: Roteamento

Tradicionalmente, o roteamento em redes IP define o processo de calcular o próximo salto do pacote em cada nó de roteamento, construindo em cada salto a rota fim-a-fim. O cálculo que define o próximo salto é feito baseado em uma tabela de rotas, que pode ser definida explicitamente ou por algoritmos de roteamento. Diferente do mundo IP, o roteamento GMPLS define um processo de distribuição da informação necessária para a base da definição de rota pelos quais os LSPs são estabelecidos.

O roteamento é realizado baseado em engenharia de tráfego, que tem o objetivo de manter a rede balanceada e livre de congestionamento. Os caminhos alocados para LSPs nem sempre são os menores, como no roteamento IP tradicional, porém os requisitos de QoS devem ser atendidos, caso contrário o estabelecimento do LSP não se torna possível.

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 (*Traffic Engineering Database*). 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 de dados. O principal componente do TED é o 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 *links* que terminam nele, assim como redistribuir informações recebidas de outros roteadores.

O roteamento no GMPLS é realizado pelo protocolo OSPF (*Open Shortest Path First*) com extensão para engenharia de tráfego (OSPF-TE) (Kompella, RFC 4203 - OSPF Extensions in Support of Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS), 2005) ou IS-IS com extensão para engenharia de tráfego (IS-IS-TE) (Kompella, RFC 4205 - Intermediate System to Intermediate System (IS-IS) Extensions in Support of Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS), 2005). Os protocolos citados permitem a descoberta de topologia e a descoberta de recursos em um domínio de roteamento através do *Link State Advertisement* (LSA).

Além dos recursos, o LSA também pode informar recursos ópticos como comprimentos de onda, restrições de camada física (ex: dispersão), efeitos não lineares, *crosstalk*, etc.

Como resultado da operação do protocolo de roteamento, cada LSR possui uma visão atualizada da topologia e recursos do domínio de roteamento, que fica armazenada em uma base de dados denominada *Link State Database*.

2.3.2.6 GMPLS: Sinalização

O processo de sinalização consiste na troca de mensagens do plano de controle para estabelecer, manter ou finalizar LSPs. Os protocolos existentes do MPLS são estendidos a fim de atender aos novos requisitos do GMPLS, como o estabelecimento de LSPs bidirecionais e o estabelecimento de LSPs hierárquicos (Farrel & Bryskin, 2006).

De maneira similar aos protocolos de roteamento, os protocolos de sinalização do GMPLS são extensões dos protocolos do MPLS, com suporte a engenharia de tráfego. Dois protocolos são especificados pelo IETF, o RSVP-TE (*ReSource*

reservation Protocol – Traffic Engineering) (Berger, 2003) e o CR-LDP (*Constraint-based Route – Label Distribution Protocol*) (Ashwood-Smith, 2003).

No RSVP-TE um serviço de transporte é fornecido através das sessões e dos túneis. Uma sessão representa os fluxos de dados que trafegam para um destino particular. Dentro de uma sessão, diversos fluxos de dados compartilham os mesmos recursos. O RSVP-TE define o conceito de túnel, ou LSP, que tem como tarefa transportar os dados entre sua entrada e a saída. Dessa forma, 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 sessão (Farrel & Bryskin, 2006).

O protocolo opera trocando mensagens IP entre os controladores de sinalização, possuindo mecanismo de confirmação e retransmissão de mensagens, assegurando a entrega de mensagens.

Um LSP é estabelecido quando um cliente faz a requisição de transmissão a um LER. Inicialmente, o sinal cliente é classificado em uma FEC (*Forward Equivalence Class*). Cada FEC é associada a um rótulo, assim se um conjunto de sinais clientes possui a mesma origem e são classificados na mesma FEC, então eles seguem o mesmo caminho.

Após o sinal ser classificado em uma FEC, uma mensagem de *Path* é transmitida ao próximo LSR do caminho definido pelo roteamento. A mensagem possui os parâmetros de QoS desejados, o identificador de LSP e possíveis restrições. Ao receber a mensagem, cada LSR verifica se pode atender aos requisitos exigidos pelos parâmetros de QoS ou restrições. Caso positivo, o LSR transmite a mensagem de *Path* para o seu LSR sucessor no caminho, após realizar algumas operações e mudanças em alguns objetos. Quando esses requerimentos não podem ser atendidos, uma mensagem de *PathError* é retornada para o LSR antecessor indicando falha na requisição do LSP.

O procedimento vai se repetindo em todos os LSRs do caminho roteado até o LER (*Label Edge Router*) egresso. O LER egresso retorna a mensagem *Resv* no sentido contrário até o LER ingresso, passando por todos os LSRs intermediários no caminho. Quando o LER de ingresso recebe a mensagem *Resv* 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. A Figura 2-15 ilustra o processo de estabelecimento e encerramento de um LSP através da troca de mensagens do protocolo RSVP-TE (Farrel & Bryskin, 2006).

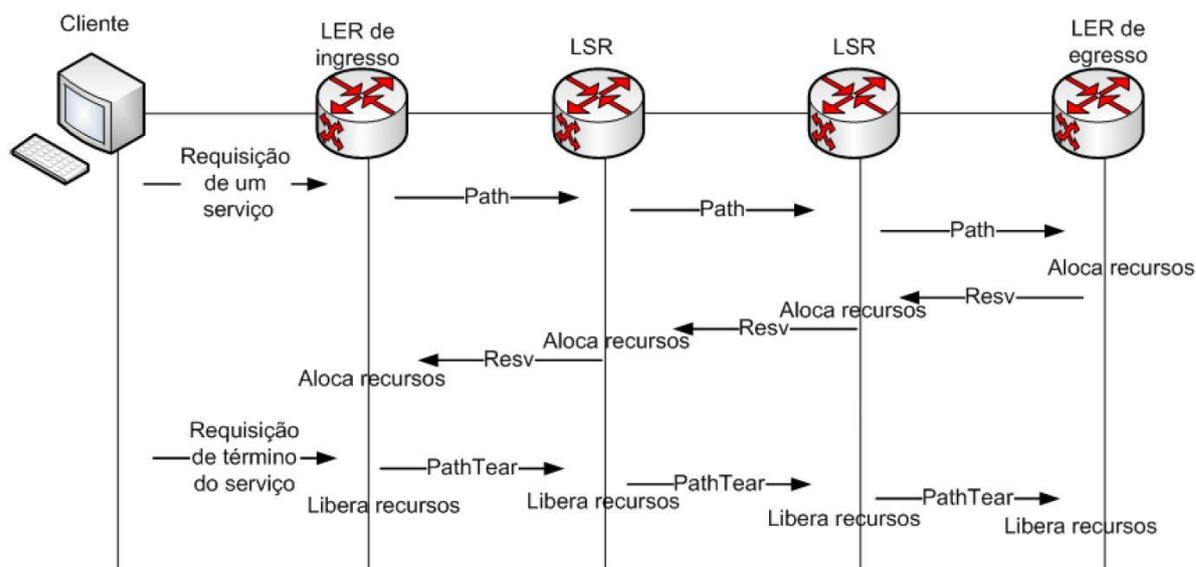


Figura 2-15 - Estabelecimento e término de um LSP. (Favoreto F. P., 2009)

A manutenção de um LSP é feita através do reenvio da mensagem de *Path*, durante um intervalo de trinta segundos, um processo denominado *Path Refresh*. Caso, em algum ponto da rede, um LSP alocado deixa de receber uma mensagem de *Path* para ele no intervalo de tempo, o RSVP entende que houve uma falha ao longo do caminho, ou o LSP deixa de ser necessário. Em ambos os casos os recursos alocados para aquele LSP são liberados. Em caso de falha, as mensagens de *Path* tomarão outro caminho e novas reservas em outros LSRs são geradas.

O processo de sinalização do RSVP do GMPLS permite que seja estabelecido LSP bidirecional. Isso significa que em um único processo de sinalização, os dois sentidos de comunicação são reservados, respeitando o mesmo QoS, fato que não era possível no MPLS, onde uma comunicação bidirecional era realizada por dois LSPs, dando margem à alocação de recursos assimétricos em direções opostas, ou seja, largura de banda diferente e até mesmo caminhos distintos.

O GMPLS é um conjunto de protocolos bastante completo para todas as disciplinas de plano de controle. Nesta seção, apenas os conceitos relevantes para esta dissertação foram descritos. Para uma descrição mais completa consulte (Favoreto F. P., 2009) que em seu trabalho explicita o GMPLS de uma forma completa e aplicado a redes ópticas.

2.3.3 Mapeamento de Redes OTN no modelo GMPLS

Um plano de controle baseado em GMPLS trabalha com vários conceitos que podem ser empregados em uma rede de transporte genérica para fins de roteamento, alocação de recursos, proteção, restauração e outras funcionalidades de plano de controle. Quando aplicado a redes OTN, é preciso fazer uma relação desses conceitos com os conceitos pertencentes à tecnologia OTN, a fim de que o plano de controle possa entender a rede de transporte e realizar sobre ela as operações necessárias para o devido funcionamento do plano de controle.

Em (Favoreto F. P., 2009), o autor se preocupa em relacionar o plano de controle GMPLS com a tecnologia OTN. O trabalho procura responder questionamentos como:

- Quais recursos das redes OTN precisam ser mapeados no plano de controle? Onde essa informação fica armazenada?
- O que são LSPs em redes OTN? E TE *link*?
- Em quais equipamentos os controladores de plano de controle são capazes de atuar?
- Quais as modificações necessárias nos protocolos do plano de controle quando ele é instanciado para redes OTN?

A resposta desses questionamentos é necessária para que o plano de controle possa entender a condição da rede, e atuar sobre os equipamentos de forma a atender as requisições de chamadas, estabelecendo LSPs na rede e garantindo a comunicação dos clientes que fazem o uso da rede de transporte para comunicação.

Seguindo a proposta de (Favoreto F. P., 2009), um LSP é responsável por prover um serviço de transporte fim-a-fim. Redes OTN fornecem dois tipos de transporte fim-a-fim, o elétrico (camada ODU) e o óptico (camada OCH). Logo, é possível definir dois tipos de LSPs em redes OTN: um TDM no nível elétrico e outro LSC no nível óptico. Dessa forma, o início e o fim de uma trilha ODU delimita um LSP TDM de camada elétrica (ODU LSP), enquanto o início e o fim de uma trilha OCH delimita um LSP LSC de camada óptica (OCH LSP). A RFC 7062 (Zhang, 2013) diz que para propósitos de plano de controle, redes OTN podem ser consideradas do ponto de vista das camadas ODU e OCH, e que gerenciar conexões em redes OTN consiste em controlar LSPs em níveis de ODU e OCH.

Outro recurso importante a ser mapeado pelo plano de controle é o TE *link*. Ainda seguindo o mapeamento proposto em (Favoreto F. P., 2009), um TE *link* é uma trilha da camada OMS, que representa o agrupamento de todos os possíveis OCHs que são transportados pela fibra, ou seja, possíveis comprimentos de onda transportados. Ainda segundo o autor, equipamentos que terminam as trilhas OMS, e, portanto, um TE *link*, é um nó do grafo que representa uma rede OTN, tendo assim suas informações representadas no TED.

2.4 GROOMING DE TRÁFEGO EM REDES ÓPTICAS

Um fluxo de dados, quando adentra em um domínio óptico, pode ter sua carga medida em termos de capacidade de comprimento de onda (λ) em uma rede comutada por circuitos ópticos (OCS – *Optical Circuit Switching*). O fluxo pode ocupar, por exemplo, $0,1 \lambda$; $0,5 \lambda$ ou $1,5\lambda$ da capacidade do comprimento de onda utilizado para o transporte. Na ausência de capacidade de *grooming* cada fluxo é mapeado em um número inteiro de comprimento de onda, causando a subutilização do recurso na maioria dos casos em que o fluxo tem taxa menor que a capacidade do comprimento de onda.

Para exemplificar o problema descrito, o seguinte cenário genérico é suposto. Quatro fluxos de dados são inseridos em um domínio OCS por um nó comum (I) e emergem da rede por diferentes nós (E1 – E4) (Figura 2-16). Considerando que

cada fluxo demande uma quantidade n de comprimentos de onda, com $n = 1, 2, 3, \dots$, então é demandado da rede $4n$ comprimentos de onda para efetuar o transporte dos quatro fluxos até o nó C (Figura 2-17).

Porém, caso os nós da rede tenham a capacidade de processar os fluxos e aplicar técnica de *grooming*, os fluxos podem ser agrupados de maneira a obter um melhor aproveitamento dos recursos a serem utilizados, no caso, comprimento de onda. Com capacidade de *grooming*, o nó I pode acomodar todos os fluxos em uma quantidade m de comprimentos de onda, onde m pode ser $\ll 4n$ (Dutta, Kamal, & Rouskas, 2008) (Figura 2-18).

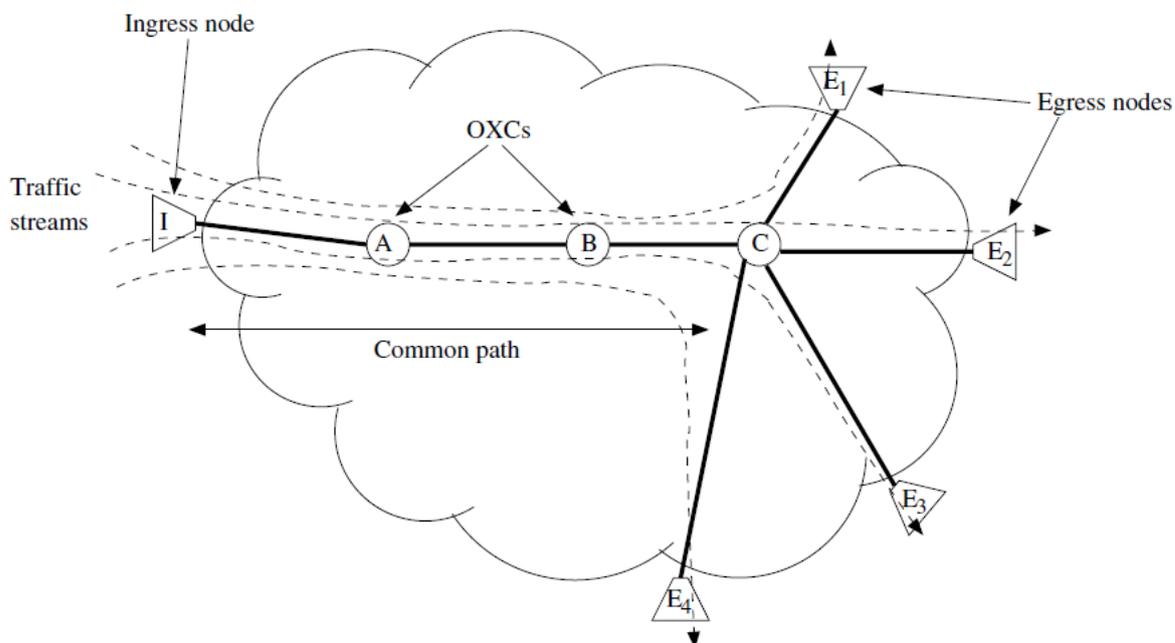


Figura 2-16 - Rede óptica provendo o transporte de quatro fluxos, ingressando pelo nó I e emergindo pelos nós E1-E4, tendo os nós A, B e C como caminho comum. (Dutta, Kamal, & Rouskas, 2008)

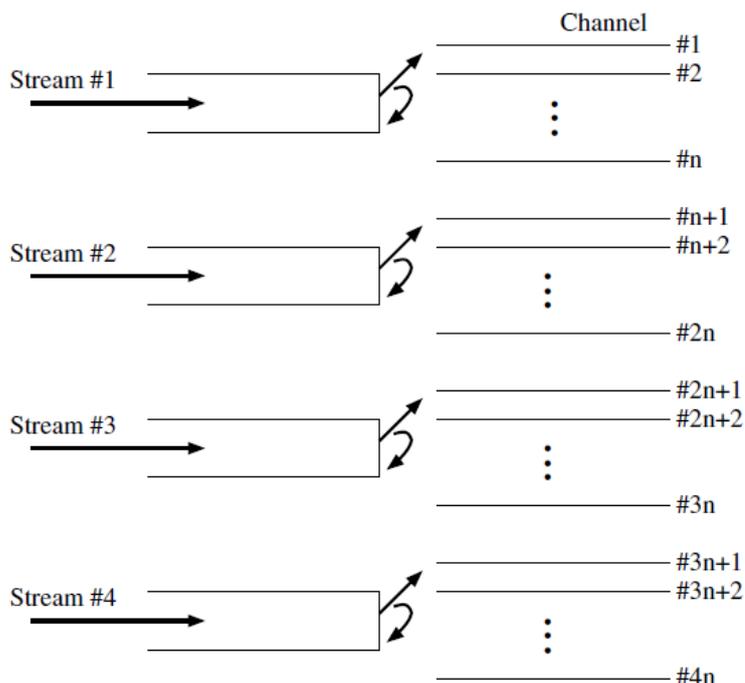


Figura 2-17 - Mapeamento dos fluxos em comprimentos de onda pela visão do nó I. (Dutta, Kamal, & Rouskas, 2008)

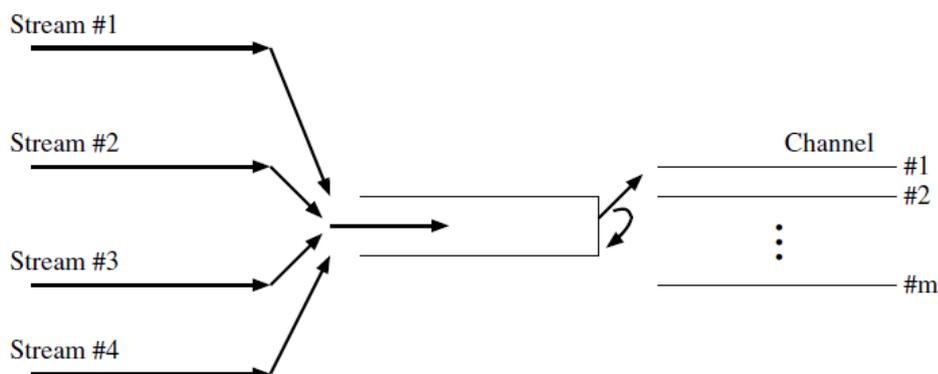


Figura 2-18- Mapeamento dos fluxos em comprimentos de onda pela visão do nó I com capacidade de *grooming*. (Dutta, Kamal, & Rouskas, 2008)

Habilitar a capacidade de *grooming* de tráfego, permitindo que vários fluxos possam compartilhar recursos, diminui a quantidade de recurso utilizado para transmissão e melhora a eficiência de aproveitamento, fator que causa impacto no custo de projeto de uma rede.

Rede de transporte de nova geração com capacidade de multiplexação elétrica e óptica deve usar técnicas de *grooming* para resolver o problema de melhor utilizar os recursos de transmissão da rede, quando as capacidades de fluxo subutilizam os recursos de transporte. O *grooming* dá flexibilidade ao planejamento de rede, pois a topologia de camadas inferiores, com maior capacidade de transporte, permanece fixa, permanece fixa. As camadas superiores, por sua vez, possuem uma topologia

virtual, dado que ela varia de acordo com as políticas de engenharia de tráfego definidas para a rede.

Explorar essa flexibilidade exige da rede mecanismos de configuração automática para atender a toda a dinamicidade de demanda de tráfego. Atualmente, para atender a esse requisito, o GMPLS juntamente ao conceito de redes ópticas comutadas definem um novo paradigma de provisionamento de serviços em redes multicamadas. Neste momento, utilizar um plano de gerência centralizado para operação da rede deixa de ser utilizado e dá lugar a abordagem de plano de controle, baseadas em funções de controle automáticas e distribuídas. Essa abordagem permite alta escalabilidade e robustez, diminuindo os custos operacionais (OPEX) em até 50% (Pasqualini, 2005).

2.4.1 Grooming de Tráfego em Redes OTN e LSPs Hierárquicos

As redes ópticas atuais, mais especificamente as redes OTN, apresentam taxa de dados de 1.25Gbps (ODU0), 2.5Gbps (ODU1), 10Gbps (ODU2), 40Gbps (ODU3) e mais recentemente 100Gbps (ODU4) que são mapeados em comprimentos de onda. As taxas mais elevadas (ODU3 e ODU4) são consideradas altas para um único tráfego origem-destino em redes de *backbone*. Para o melhor aproveitamento de capacidade, vários tráfegos de dados de baixa ordem devem ser multiplexados em um único *lightpath* (no caso de redes OTN, OCH), preenchendo o máximo possível toda sua capacidade de transporte. Todos os tráfegos multiplexados em um OCH não necessariamente tem o mesmo destino, alguns podem ser retirados no meio do caminho, assim como outros podem ser inseridos. Essa condição é atendida pela conversão O-E-O e comutação elétrica (Dutta, Kamal, & Rouskas, 2008).

O plano de controle GMPLS atuando sobre a tecnologia OTN no *OTNSwitch* pode ser considerado uma importante plataforma de transporte com alta capacidade de *grooming* (Dutta, Kamal, & Rouskas, 2008). Isso possibilita que os clientes sejam mapeados diretamente em um OCH, caso sua taxa não subutilize o recurso, ou multiplexados com outros sinais clientes de forma a formar um OCH com desperdício mínimo de banda. Utilizando métodos que garantem a qualidade de

serviço e mapeamento de sinal cliente flexível, o *OTNSwitch* suporta adaptação de banda de acordo com as necessidades de aplicação. Baseado no procedimento de mapeamento de sinal cliente GFP (*Generic Frame Procedure*) (ITU-T, 2012), praticamente qualquer granularidade de cliente é suportada. A introdução do PT-21 (*Payload Type 21*) (ITU-T, 2012) permite uma enorme flexibilidade na multiplexação de ODU de baixa ordem em ODU de alta ordem (Figura 2-5), permitindo que qualquer combinação de sinais clientes de baixa ordem seja multiplexado em um sinal cliente de alta ordem, melhor aproveitando o uso de recursos da rede.

A hierarquia de multiplexação de ODU (apresentada em 2.1.2, Figura 2-5) permite uma hierarquia natural de LSPs no nível elétrico. Uma ODU de baixa ordem (ODU LO – ODU *Low Order*), que define um ODU LSP, pode ser multiplexada em uma ODU de alta ordem (ODU HO - ODU *High Order*), ou seja, um ODU LSP de baixa ordem pode ser aninhado em outro ODU LSP de ordem mais alta, junto com outros ODU LSP de baixa ordem para fins de transporte na rede. Outro aninhamento de LSP na OTN ocorre quando a ODU HO que transporta várias ODU LO, é mapeado em um comprimento de onda, determinando um OCH. Nesse momento, têm-se vários ODUs LSP de baixa ordem aninhados em um ODU LSP de alta ordem, que, por sua vez, encontra-se aninhado em um OCH LSP. Essa hierarquia permite que o plano de controle possa aproveitar ODU LSP de alta ordem e OCH LSP já estabelecidas na rede para o transporte de novas requisições, caso haja recursos, que entende se por *slots* TDM, no ODU LSP de alta ordem sendo transportada pelo OCH LSP (Figura 2-19).

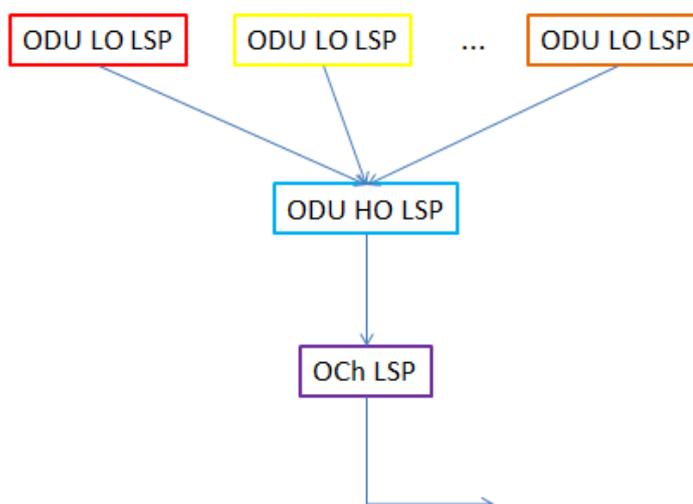


Figura 2-19 - Hierarquia de LSPs.

No *OTNSwitch* essa hierarquia é estabelecida na interface NIC. A saída da interface NIC define um OCH transportando um ODU HO. A entrada da NIC recebe sinais ODU LO que, através dos processos de multiplexação TDM ODU interno à NIC, são multiplexados na ODU HO, como descrito anteriormente.

A Figura 2-20 exemplifica o processo de multiplexação realizado interno a NIC. Sua saída é um OCH que transporta um ODU4. Os sinais que utilizam essa NIC para transporte podem ser multiplexados no ODU4 de alta ordem de formas diferentes. A título de exemplo, o sinal pode ser multiplexado diretamente no ODU4 de alta ordem, como é o caso do sinal 1. Caso sua taxa seja menor que ODU2, há a possibilidade do sinal ser multiplexado em um ODU2 (sinal 2), multiplexado novamente com outros sinais em um ODU3 (sinal 3) e posteriormente ser multiplexados no ODU4 de alta ordem.

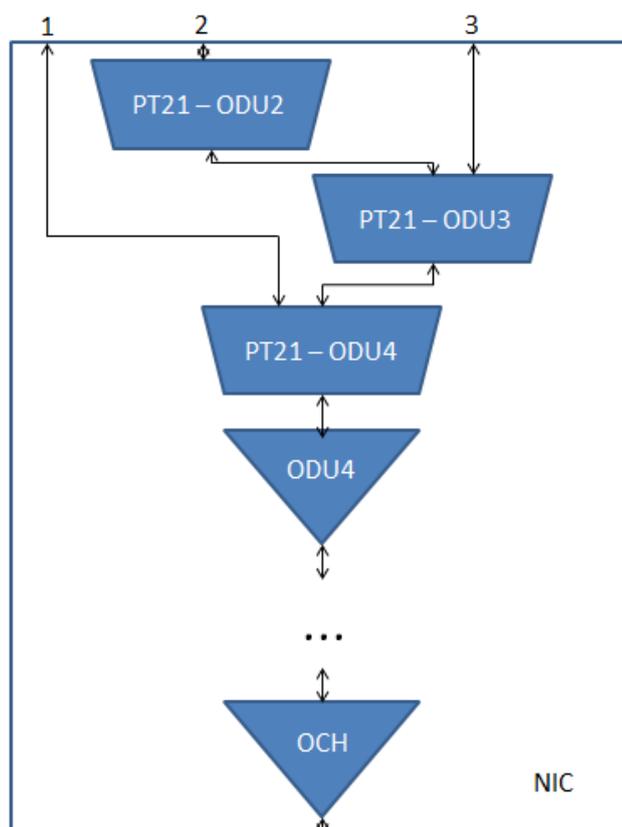


Figura 2-20 - Exemplo de hierarquia de multiplexação realizado na NIC.

A forma como se dá a multiplexação do sinal interno na NIC depende da porta de entrada a qual o sinal é direcionado pela matriz de comutação elétrica do equipamento, definida pelo plano de controle durante a alocação de recursos, pois cada porta define a hierarquia de multiplexação a ser seguida pelo sinal. A

tecnologia OTN é flexível, o processo apresentado na Figura 2-20 apenas exemplifica uma das várias possibilidades de multiplexação.

Multiplexando vários tráfegos em um único comprimento de onda permite um melhor gerenciamento do tráfego em relação à comutação e proteção. Por exemplo, a comutação pura (sem conversão O-E-O) do comprimento de onda da origem ao destino garante que todo o tráfego multiplexado no comprimento de onda seja entregue. O mesmo ocorre caso seja necessário realizar proteção dos sinais. Protegendo o comprimento de onda, todos os tráfegos ali multiplexados serão protegidos por consequência.

3 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta uma proposta de plano de controle para redes ópticas comutadas que atua no equipamento *OTNSwitch*, implementado pelos protocolos GMPLS capaz de, automaticamente, estabelecer LSPs em nível hierárquico, aproveitando LSPs de alta ordem já provisionados para transporte, através dos processos de roteamento e sinalização.

3.1 PLANO DE CONTROLE PARA REDES DE NÚCLEO BASEADAS EM *OTNSWITCH*

O plano de controle é proposto para atuar em redes ópticas comutadas utilizando o GMPLS (Figura 3-1), sendo capaz de alocar recursos de comutação nos equipamentos, dada uma demanda de comunicação entre clientes fim-a-fim, aproveitando melhor os recursos de comutação de cada equipamento provendo o *grooming* de tráfego na rede através do mapeamento de LSPs hierárquicos na capacidade de multiplexação da tecnologia OTN.

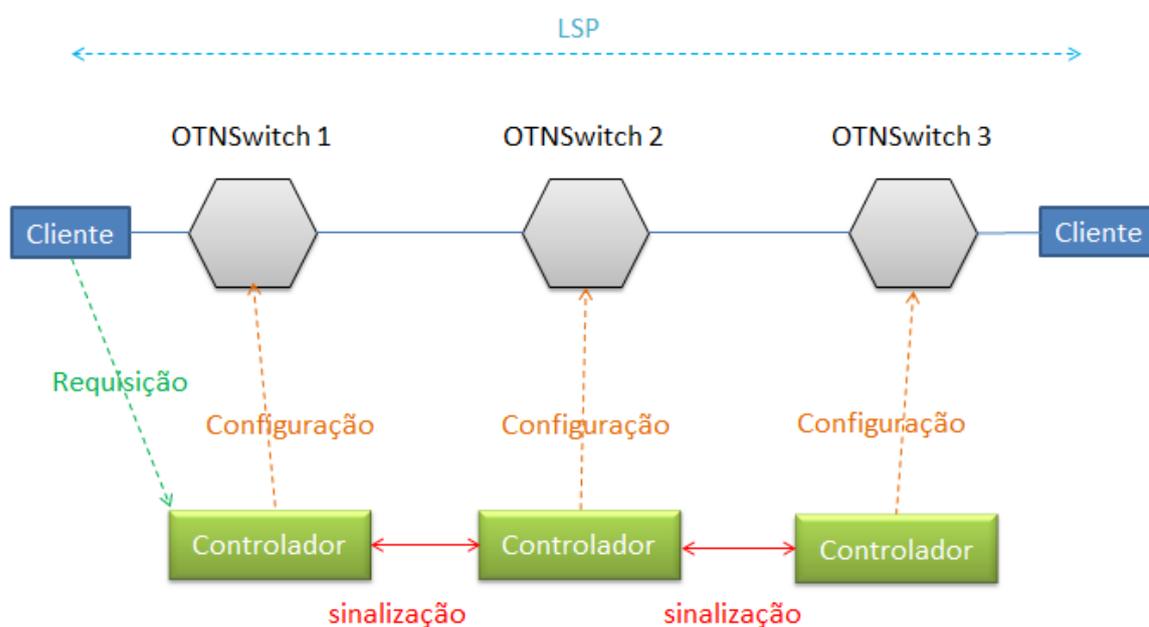


Figura 3-1 - Alocação de recurso no equipamento.

3.1.1 Plano de Controle para o Equipamento *OTNSwitch*

Na literatura encontra-se apenas o modelo de redes, especificando que o plano de controle GMPLS atua sobre redes ópticas comutadas, e os benefícios trazidos por esse modelo. Por outro lado, não é especificado como que se dá essa relação entre plano de controle e plano de transporte de uma forma mais concreta, ou seja, como que o plano de controle consegue mapear o plano de transporte e atuar de forma a prover meios de alocar recursos na rede aproveitando toda a capacidade de dinamicidade, automatização e *grooming* que as redes OTN oferecem ao modelo “IP sobre ASON/GMPLS”.

Buscando preencher esta lacuna, a descrição do plano de controle proposto nesta dissertação procura abranger a integração do plano de controle GMPLS à arquitetura do equipamento *OTNSwitch*, respeitando toda a organização de arquitetura descrita nas recomendações da ITU-T e RFCs da IETF. A arquitetura deve fornecer um plano de controle que estabelece formas de mapeamento de recursos do plano de transporte e permite o processo de sinalização, roteamento e configuração do equipamento para atender demandas de forma automática e melhor utilizar os recursos disponíveis na rede, como descrito nas seções 2.3.3 e 2.4.1.

3.1.1.1 Arquitetura de Plano de Controle Integrada ao Equipamento *OTNSwitch*

Como visto em 2.2.2, cada equipamento *OTNSwitch* possui em sua arquitetura de gerência a funcionalidade de plano de controle. Segundo a recomendação ITU-T G.7718 (ITU-T, 2010) essa funcionalidade abriga em seu interior toda a organização dos blocos funcionais do ASON. Os blocos funcionais apenas definem os requisitos de plano de controle enquanto o GMPLS especifica os protocolos que atendem os requisitos dos blocos funcionais do ASON. Para atender aos objetivos desta dissertação, é utilizado o controle e estabelecimento de chamada e o controle de roteamento, e eles se relacionam com o GMPLS da seguinte forma:

- **Controle e estabelecimento de chamadas (*Call Controller*):** implementado pelo RSVP-TE;

- **Controle de roteamento (*Routing Controller*):** implementado pelo OSPF-TE;

Internamente à funcionalidade de plano de controle, existem instâncias dos protocolos sendo executadas. Essa configuração define um plano de controle distribuído, onde a cada *OTNSwitch* existe um controlador do plano de controle que troca mensagens de seus protocolos através do canal de controle pela rede DCN.

O canal de controle não possui uma forma de implementação recomendada, a única exigência feita em sua modelagem é que ele utilize o IP para troca de informações, uma exigência da RFC3945 (Mannie, 2004). Para atender esse requisito, os protocolos são modelados como uma aplicação que utiliza uma porta para envio e recebimento de suas informações sobre a camada de rede, responsável pelo tratamento de pacotes IP. Assim, o controlador deve possuir interfaces de rede para receber e transmitir pacotes IP durante a troca de informação entre controladores adjacentes (Figura 3-2).

A camada de rede é responsável por encaminhar os pacotes para cada interface de saída de acordo com o roteamento do pacote, que tem como destino um controlador adjacente com a mesma arquitetura. Nota-se que o plano de controle é separado do plano de transporte, pois as mensagens do plano de controle trafegam em uma rede separada da mensagem de dados, uma característica do GMPLS.

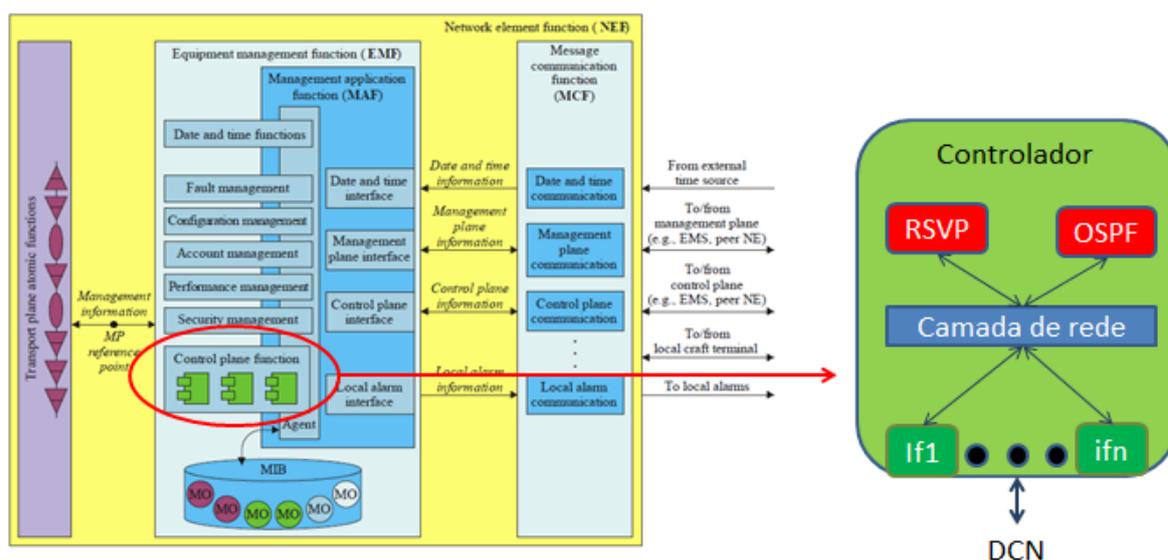


Figura 3-2 - Integração do plano de controle ao sistema de gerência.

Esta arquitetura permite que os protocolos RSVP-TE e OSPF-TE troquem informações, possibilitando ao plano de controle estabelecer processos de sinalização e roteamento, respectivamente.

Além dos protocolos, o controlador abriga o TED (*Traffic Engineering Database*), que contém as informações sobre os TE *Links* e recursos disponíveis, e a tabela de rótulos (*LibTable*), que guarda informações sobre os recursos ocupados do equipamento. A arquitetura completa do controlador é mostrada na Figura 3-3.

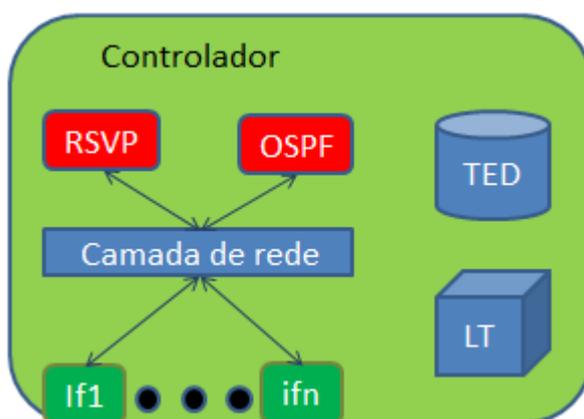


Figura 3-3 - Arquitetura completa do controlador.

A Figura 3-4 ilustra uma visão geral da arquitetura do plano de controle, com um controlador para cada equipamento, responsável por executar as funcionalidades de plano de controle.

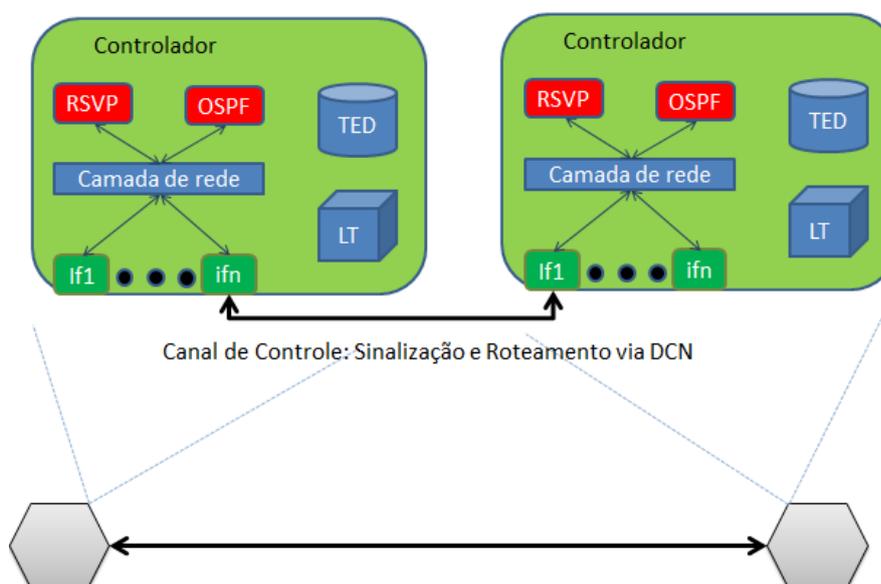


Figura 3-4 - Arquitetura distribuída de plano de controle.

Com a integração entre o plano de controle e o equipamento apresentada, o plano de controle tem toda a estrutura necessária para trocar informações, alocar recursos e configurar o equipamento, seguindo a organização da recomendação G.7718 (ITU-T, 2010) e os princípios de troca de informação exigidos pela RFC3945 (Mannie, 2004). Até o momento, é mostrada apenas a arquitetura para troca de mensagens necessárias ao funcionamento do plano de controle e os elementos onde são guardadas informações de recursos do plano de transporte. Os processos de mapeamento e alocação de recursos no equipamento pelo plano de controle são abordados nas seções seguintes.

3.1.1.2 Mapeamento de Recursos no Plano de Controle

O plano de controle é responsável por, principalmente, rotear e alocar recursos da rede diante de uma demanda de tráfego. Para desempenhar essas atividades, o plano de controle deve entender o plano de transporte, a fim de determinar como o tráfego será roteado pela rede e quais recursos são passíveis de serem alocados para o tráfego, estabelecendo um LSP na rede.

As redes OTN apresentam como recurso de transporte *slots* TDM e comprimentos de onda, de forma que o cliente que é transportado na rede primeiro ocupa *slots* TDM que, posteriormente, são mapeados em um comprimento de onda. O plano de controle deve reconhecer quais são esses *slots* TDM e comprimentos de onda disponíveis no equipamento.

Segundo a recomendação ITU-T G.709 (ITU-T, 2012), os *slots* TDM tem a capacidade de 1,25 Gbps. Uma ODU4 de alta ordem pode transportar 80 *slots* que são divididos entre as ODUs de baixa ordem que utilizam a ODU4 como transporte de alta ordem. Dessa forma, se uma NIC multiplexa todo o tráfego que a utiliza em uma ODU4, ela apresenta 80 *slots*. A capacidade da NIC e o número de *slots* é uma relação direta, portanto, sabendo a capacidade de cada NIC, o plano de controle é capaz de determinar a quantidade de *slots* ali disponíveis para comutação, uma vez que a granularidade do *slot* TDM OTN é padronizada. Já para o mapeamento de comprimento de onda, cada OIC possui uma capacidade de comprimentos de onda

que podem ser multiplexados e transmitidos em uma fibra, gerando uma seção OMS.

O plano de controle realiza o mapeamento desses recursos através do TED. O TED armazena as informações de capacidade da NIC e número de comprimentos de onda da OIC (Figura 3-5). Essas informações devem ser capazes de informar ao plano de controle se existem recursos disponíveis no equipamento para atender um novo LSP. Assim, ao receber uma requisição de LSP, o plano de controle verifica se existem CICs, NICs e OICs com capacidade disponível que acomode e direcione o tráfego de acordo com o roteamento definido.

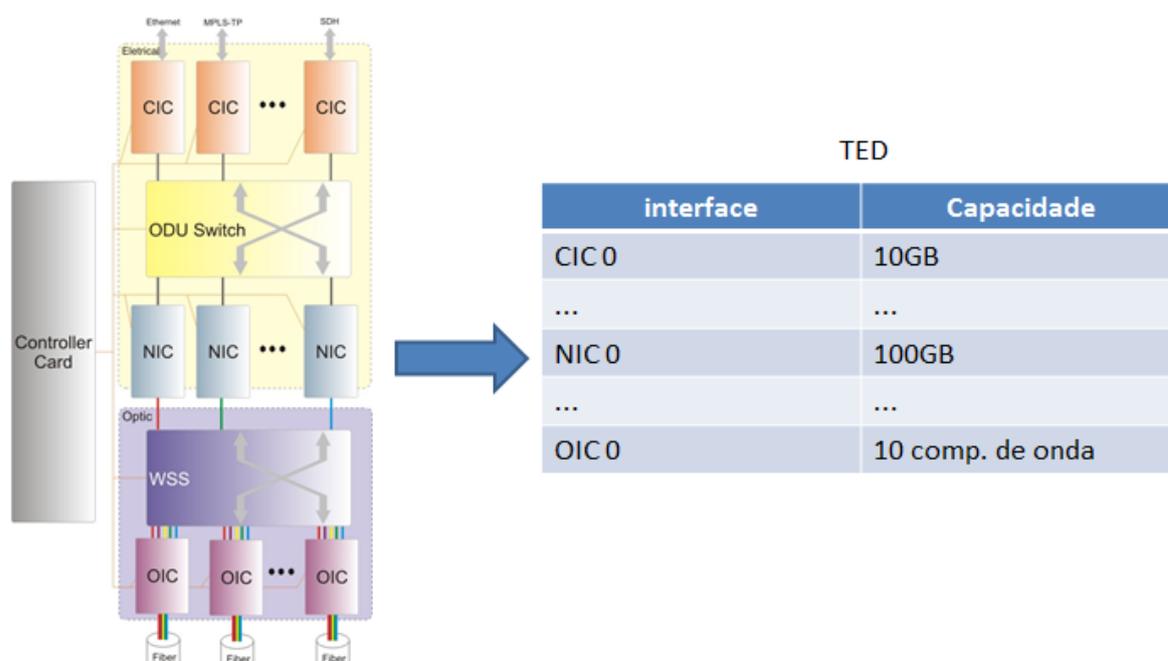


Figura 3-5 - Mapeamento de recursos no TED.

3.1.1.3 Processo de Sinalização

A troca de informação entre os controladores de plano de controle de cada equipamento *OTNSwitch* que compõe a rede é realizada pelo protocolo de sinalização do GMPLS, o RSVP-TE. Sua especificação inicial apresenta formatos de mensagens que não atendem todos os requisitos necessários para realizar a sinalização de um caminho em uma rede OTN. Para abranger o processo de estabelecimento de LSPs em redes OTN tomando como base a recomendação

G.709 (ITU-T, 2012), a IETF especifica um conjunto de extensões ao protocolo, apresentados na RFC4328 (Papadimitriou, 2011).

O processo continua sendo baseado na troca de mensagens *Path* e *Resv* que são sinalizadas entre os LSRs (controladores) na rede para atender a uma requisição de alocação de caminho, como demonstrado na seção 2.3.2.6. A mensagem de *Path* deve incluir o objeto *Generalized Label Request*, que especifica os detalhes do LSP sendo estabelecido. O *Generalized Label Request* inclui o tipo de LSP a ser estabelecido (ODU ou OCH LSP), o tipo de comutação (TDM ou LSC) e o G-PID, que identifica a carga do LSP (*Ethernet*, ATM, etc).

As mensagens de *Path* e *Resv* também sofrem algumas alterações quando o RSVP-TE é utilizado em redes OTN. Os parâmetros que identificam o tipo de tráfego OTN são transportados pelo objeto *Sender_Tspec* na mensagem *Path*, e *Flowspec* na mensagem *Resv*. Esses parâmetros são:

- **Signal Type:** indica o sinal sendo transportado no LSP, ou seja, ODU0, ODU1, ODU2, ODU3, ODU4, OCH1, OCH2, OCH3 e OCH4;
- **Number of Multiplexed Components:** indica o número de sinais ODU em uma multiplexação TDM;
- **Interface In:** Indica por qual interface o cliente está fazendo a requisição de LSP;
- **Interface Out:** Indica qual é a interface com a qual o LSP deve ser finalizado no nó de destino.

Esses valores são utilizados para o plano de controle verificar se existem recursos disponíveis para atender ao LSP sinalizado entre as interfaces indicadas dos equipamentos de origem e destino e aplicar a hierarquização de LSP.

O processo tem início com a requisição de um cliente enviada à rede para um caminho fim-a-fim bidirecional. O nó que recebe essa requisição verifica se existe recurso local que atende à demanda, o processo de seleção e alocação de recursos são abordados da próxima seção. Havendo recursos suficientes localmente eles são pré-alocados para o LSP. Adicionalmente, o RSVP dispara uma mensagem de *Path* ao próximo nó do caminho, determinado pelo OSPF - TE. A mensagem de *Path*

transmite ao próximo nó do caminho os parâmetros da chamada como tipo de sinal, endereço de destino, interface de destino, e outras informações contidas no objeto *Sender_Tspec* (Berger, 2003).

A rota é calculada em cada nó pela estratégia *hop-by-hop* que analisa o endereço de destino e determina o próximo salto, consultando uma tabela de roteamento que reflete a topologia da rede mantida atualizada pelo OSPF-TE (seção 2.3.2.5). Como métrica de roteamento é utilizada o número de saltos. Assim, ao receber uma requisição o nó analisa o destino e, caso não seja ele, determina o próximo nó que faz parte da rota com menor número de saltos.

Ao receber a mensagem de *Path*, o próximo controlador de chamada analisa os parâmetros da requisição e consulta o TED verificando se o equipamento possui recursos suficientes para atender a chamada. Caso positivo, os recursos são pré-alocados e uma mensagem de *Path* é disparada para o próximo nó. Caso contrário, uma sinalização de erro é disparada (*PathError*), indicando a impossibilidade do estabelecimento do LSP. O processo se repete até que o destino final seja alcançado.

Entende-se por pré-alocar recursos, selecionar as interfaces e *slots/comprimento* de onda das interfaces disponíveis no equipamento a serem utilizados, criando um estado para aquela chamada, denominado de *Path State Block* (PSB) (Berger, 2003). Esse estado bloqueia os recursos pré-alocados, impossibilitando que ele seja utilizado por novas requisições que sejam feitas ao equipamento durante o processo de estabelecimento de LSP da requisição atual.

Quando a sinalização de reserva de caminho chega ao destino, outro LER do domínio GMPLS, os recursos são alocados localmente de forma bidirecional, ou seja, são instalados os *labels* que representam os recursos alocados e é feito o pedido de configuração ao equipamento, e o objeto *Sender_Tspec* tem seus parâmetros copiados para o objeto *Flowspec*, a ser utilizado pela mensagem *Resv*. Uma mensagem *Resv* é transmitida no sentido reverso com os parâmetros da chamada, confirmando que o caminho pode ser alocado para atender a chamada requisitada. Os nós integrantes do caminho, ao receber a mensagem *Resv*, efetuam

a alocação bidirecional dos recursos que foram anteriormente pré-alocados (Figura 3-6).

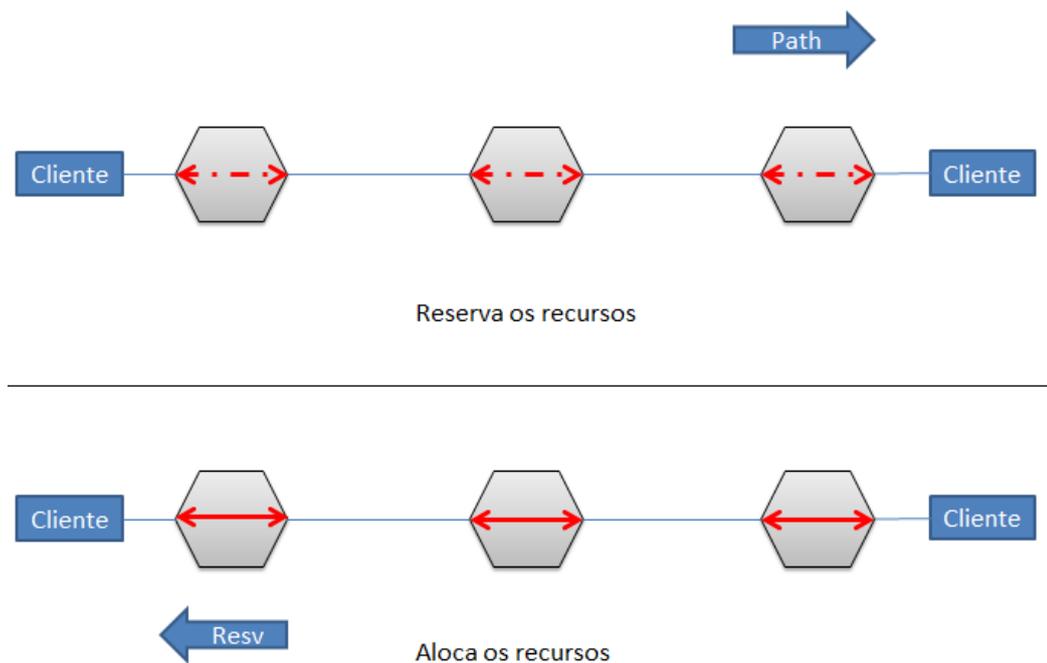


Figura 3-6 - Processo de sinalização: Reserva e alocação de recursos.

O caminho é ativado de forma bidirecional quando a mensagem *Resv* atinge o nó de origem da chamada. Nesse momento, todos os recursos estão alocados, e o cliente pode fazer sua transmissão de dados fim-a-fim. Como descrito, o processo de sinalização entra em ação ao receber uma requisição de uma demanda. A partir de então, todo o processo de roteamento, reserva de recursos e sinalização de caminho segue de uma forma automática, pela troca de mensagens entre os controladores integrados ao equipamento como proposto na arquitetura.

Para melhor compreensão do processo de sinalização, é apresentado no Apêndice I o diagrama de fluxo do processamento de uma mensagem de sinalização por um nó.

3.1.1.4 Alocação de recursos no OTNSwitch

Reservar um recurso significa reservar uma determinada capacidade de comutação entre interfaces de entrada e interfaces de saída (Dutta, Kamal, & Rouskas, 2008), em outras palavras, determinar quais interfaces e quais slots TDM e comprimento de onda atenderão à requisição. No *OTNSwitch*, isso significa configurar as matrizes de comutação óptica e elétrica para direcionar o sinal aos *slots* TDM/Comprimentos de onda das interfaces selecionadas pelo plano de controle, direcionando o tráfego corretamente ao seu destino salto a salto pela rede.

Para os propósitos de estabelecer um caminho fim-a-fim para cada sessão RSVP, é proposto que os recursos possam ser alocados em cada equipamento do caminho em três configurações distintas: *Add/Drop* (Figura 3-7 a), *Passthrough Óptico* (Figura 3-7 b) e *Passthrough Elétrico* (Figura 3-7 c).

A alocação na configuração *Add/Drop* consiste em alocar o recurso nas extremidades do caminho (LER de Entrada) determinado pela sessão RSVP, reservando os recursos da interface cliente (CIC), interface de rede (NIC) e interface óptica (OIC), no sentido bidirecional, ou seja, enviando e recebendo informação. Para isso, as matrizes de comutação digital (*ODU Switch*) e óptica (WSS) devem ser configuradas pelo plano de controle para que o fluxo de informação passe pelas interfaces que possuem recursos disponíveis utilizando os *slots* TDM e comprimento de onda selecionado. Com essa configuração o equipamento consegue transmitir a informação do cliente, conectado em uma de suas interfaces clientes, para a rede, justificada em um quadro OTN já em formato de sinal óptico.

A comutação nos nós intermediários da rede pode ocorrer de duas formas distintas. Uma forma é a comutação puramente óptica, não sendo realizada a conversão O – E – O, evitando a inserção de atrasos no sinal provocados pela conversão e processo de multiplexação em todos os nós intermediários (Dutta, Kamal, & Rouskas, 2008). A outra forma se dá quando ocorre a conversão O – E – O e a comutação acontece no domínio elétrico, permitindo o uso da multiplexação TDM, possibilitando um melhor aproveitamento de comprimento de onda.

Para distinguir qual dos dois tipos de comutação é realizado, é proposta a utilização do parâmetro *switching type* da sessão RSVP, transmitido através da mensagem *Path*. Caso o parâmetro informe o tipo de comutação “*Lambda*”, será realizado a comutação apenas no domínio óptico, onde os recursos de alta ordem (e por consequência as NICs utilizadas) são utilizados exclusivamente pelos tráfegos pertencentes à sessão RSVP em questão, sendo configurado um OCH LSP fim-a-fim. A comutação no domínio elétrico ocorre quando o parâmetro *switching type* informa o tipo de comutação “*Digital Wrapper*”, onde neste caso o sinal é convertido para o domínio elétrico e a comutação ocorre em nível ODU, permitindo o compartilhamento dos recursos de alta ordem (e consequentemente das NICs) com outras sessões RSVP que passam pelo nó.

O modo de alocação *Passthrough Óptico* é realizado quando o recurso é alocado em um nó intermediário do caminho (LSR), não sendo necessária a conversão O – E – O pois nenhum dos tráfegos multiplexados no comprimento de onda é retirado e nenhum tráfego é inserido no comprimento de onda durante a passagem pelo nó intermediário. Apenas interfaces OIC são envolvidas no processo. O plano de controle deve alocar os recursos para acomodar o comprimento de onda recebido pela interface de entrada e direcioná-lo para a interface OIC de saída, definida de acordo com o roteamento do sinal:

- <OIC, comprimento de onda> de entrada;
- <OIC, comprimento de onda> de saída.

O modo de alocação *Passthrough Elétrico* é realizado quando o recurso é alocado em um nó intermediário no caminho (LSR), não sendo necessário que o sinal chegue à interface cliente, pois nenhum cliente será extraído localmente para a sessão RSVP em questão, porém podem existir outras sessões que realizam *Add/Drop* de sinal no nó compartilhando os mesmos LSPs de alta ordem, sendo necessária a conversão O – E – O para adição/extração de sinal multiplexado no ODU de alta ordem. Apenas as interfaces NIC e OIC são envolvidas no processo de alocação, que consiste em selecionar os parâmetros seguindo as informações de origem e destino da chamada determinadas pelo roteamento:

- <OIC, comprimento de onda> de entrada;

- <NIC, *slots* TDM> de entrada;
- <NIC, *slots* TDM> de saída;
- <OIC, comprimento de onda> de saída.

A seleção das interfaces e seus recursos (*slot* TDM ou comprimento de onda) determinam a configuração da matriz de conexão óptica e elétrica do equipamento.

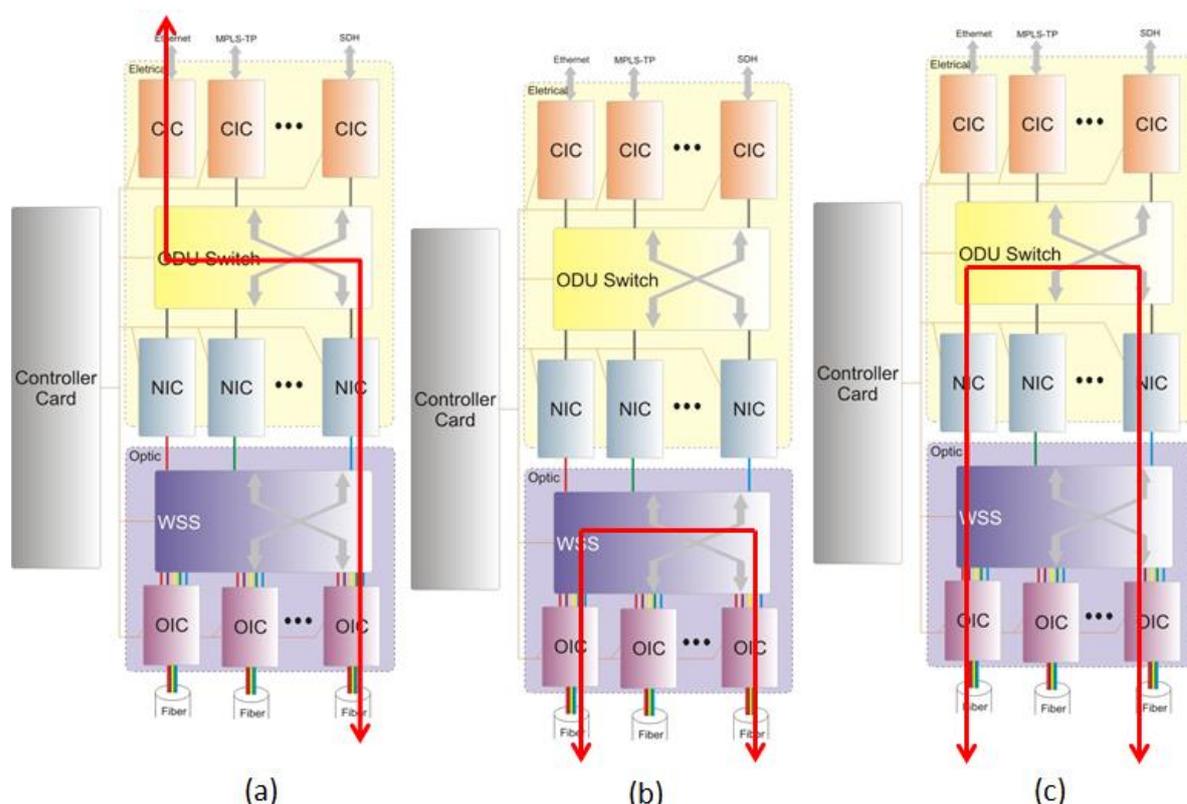


Figura 3-7 - Configuração Add/Drop (a), configuração Passthrough Óptico (b) e configuração Passthrough Elétrico(c).

Um ponto importante a ser destacado é a seleção dos *slots* TDM a serem utilizados. A NIC utilizada apresenta como saída um ODU4, logo ela apresenta 80 portas de entrada, para que seja possível o transporte de 80 ODU0, um em cada porta. Nesse caso, para cada porta existe um *slot* TDM associado. Porém, é possível que a NIC seja utilizada para o transporte de apenas um cliente ODU4, e assim todos os 80 *slots* TDM são utilizados para apenas uma única porta, e as demais portas da NIC são inutilizadas, pois não existem mais *slots* TDM disponíveis na ODU4 de saída. O número de *slots* TDM associados a uma porta da NIC depende da taxa a ser transmitida por aquela porta, sendo um parâmetro configurável. Segundo a RFC 7062 (Zhang, 2013), a configuração das portas pode ser realizada pelo plano de controle ou por um sistema de gerência.

Considera-se nesta dissertação que as portas das NICs encontram-se configuradas previamente via sistema de gerência, permitindo que o plano de controle realize o mapeamento das portas e suas respectivas taxas. Dessa forma, a seleção da porta a ser utilizada e conseqüentemente os *slots* TDM associados a ela é realizado de acordo com a taxa do cliente, ou seja, se o LSP irá transmitir uma taxa de ODU3, por exemplo, uma porta ODU3 da NIC deve ser selecionada, caso exista e esteja disponível para uso.

Definido os três modos de alocação, o plano de controle deve ser capaz de gerenciar os recursos locais do equipamento, de forma a melhor utiliza-los. O plano de controle proposto utiliza o conceito de LSPs hierárquicos. Para tanto, o plano de controle utiliza um determinado processo para reserva de recursos, descrito a seguir.

Quando uma requisição é feita ao plano de controle, ele calcula qual é o próximo nó do caminho. Essa informação é importante para o plano de controle determinar quais as interfaces OICs serão utilizadas para atender a requisição. O tipo de comutação da sessão é verificado, determinando a comutação a ser realizada.

Caso seja comutação óptica, o plano de controle direciona o sinal óptico (seja recebido pela OIC (nó intermediário) de entrada ou NIC (nós de borda)) à OIC de saída. Nesse caso, pode haver a conversão de comprimento de onda, caso o comprimento de onda da entrada já esteja em uso na OIC de saída.

Caso o tipo de comutação seja elétrico, o plano de controle verifica se já existe um comprimento de onda sendo transmitido pela OIC de saída que pode acomodar o tráfego, ou seja, o plano de controle verifica no TED se já existe uma NIC com seu OCH de alta ordem (e por conseqüência um ODU de alta ordem) com uma taxa compatível com a taxa do sinal disponível para acomodar o tráfego utilizando a OIC determinada, dadas as restrições de compartilhamento de recursos pelas sessões RSVP indicado pelo *switching type*. Se houver recursos de alta ordem com capacidade de acomodar o tráfego, o LSP de baixa ordem é acomodado no LSP de alta ordem pré-estabelecido pela hierarquização dos LSPs. Caso não exista capacidade, o plano de controle irá alocar primeiramente os recursos de alta ordem para depois alocar os recursos de baixa ordem nos LSPs de alta ordem,

selecionando uma nova NIC e comutando seu comprimento de onda para a OIC determinada pelo roteamento.

Nesse último caso, se o LSP de baixa ordem não ocupar toda a capacidade do LSP de alta ordem criado, a disponibilidade desse novo LSP de alta ordem estabelecido poderá atender a novas demandas de modo compartilhado com aquelas já atendidas. Dessa forma, sempre que possível, são aproveitados os LSPs de alta ordem já estabelecidos para acomodar novos LSPs de baixa ordem.

Os recursos são alocados pelo RSVP durante o processo de sinalização, na criação do PSB pelos nós do caminho. Ao receber uma requisição por uma mensagem *Path*, o RSVP solicita ao TED recursos para atender à requisição, de acordo com as informações da *Path*. O TED possui em sua estrutura de dados informações sobre a disposição das LSPs de alta ordem já estabelecidas (FA-LSP), e devolve os recursos que, sempre que possível, utilizam os recursos de alta ordem já alocados para transporte.

Um diagrama de fluxo para o processo é ilustrado no Apêndice II para melhor compreensão.

3.1.1.5 Configuração do Equipamento

Durante o processo de estabelecimento de LSPs, o plano de controle deve atuar sobre o equipamento, configurando as matrizes de conexão (óptica e elétrica). Para realizar essa tarefa, é preciso que haja uma forma de comunicação entre a funcionalidade e gerência do equipamento e o plano de controle. Na arquitetura proposta, essa comunicação é feita pela gerência de configuração. A gerência de configuração define primitivas para realizar os três tipos de configuração: *ConfigureAddDrop*, *ConfigurePassThroughOptico* e *ConfigurePassThroughElétrico*. Através das primitivas, o plano de controle descreve os recursos envolvidos na configuração para a gerência de configuração, que utilizando o sistema de gerenciamento aloca os recursos solicitados.

Para configurar as matrizes de comutação, a gerência de configuração precisa saber quais as portas serão conectadas nas matrizes. Para saber esses valores, é realizada uma consulta à MIB, que basicamente armazena em quais portas das matrizes estão localizados os recursos envolvidos na configuração. Tendo o valor das portas envolvidas, a gerência de configuração dispara comandos para conectar as portas solicitadas. Esse processo aloca os recursos para atender à requisição, ou seja, configura o equipamento para comutar os *slots* TDM e comprimentos de onda de acordo com o solicitado pelo plano de controle.

O processo de configuração do equipamento e a interação entre os elementos pertinentes no processo são sintetizados no diagrama de sequência apresentado no Apêndice III.

3.1.1.6 LSPs Hierárquicos no OTNSwitch

Como mencionado anteriormente, as redes OTN, juntamente com o plano de controle GMPLS, é uma plataforma flexível, com alta capacidade de *grooming*, permitindo um melhor aproveitamento de seus recursos. Para exemplificar essa característica, o cenário da Figura 3-8 é considerado.

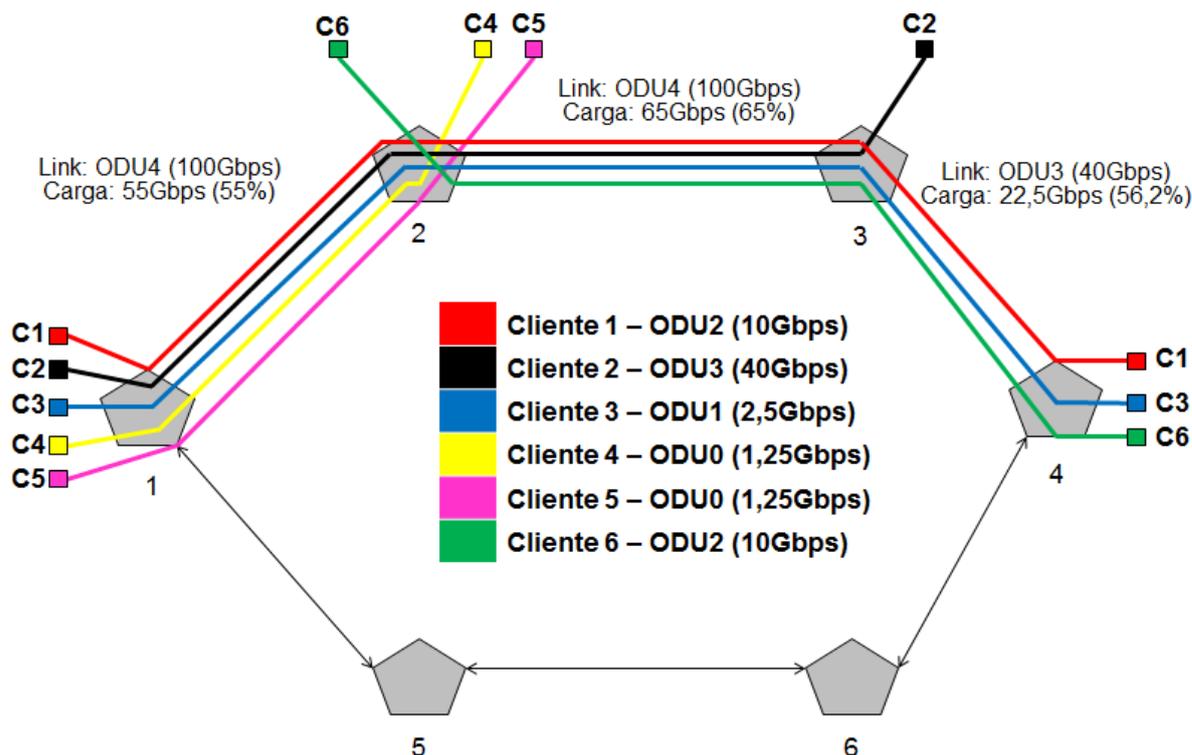


Figura 3-8 - LSPs hierárquicos no *OTNSwitch*.

O cenário apresenta uma topologia em anel, onde cada elemento de rede é um *OTNSwitch*. Suas portas de interface com clientes são capazes de receber sinais de várias taxas (ODU0, ODU1, ODU2, ODU3 e ODU4), realizar mapeamento e multiplexação na hierarquia digital OTN e entregar para a rede um quadro OTN pronto para ser mapeado em um canal óptico, transmitido em um comprimento de onda.

A capacidade de *grooming* das redes OTN é ilustrada na Figura 3-9. Para o melhor aproveitamento de recursos, pode-se utilizar vários estágios de multiplexação de ODU, como observado no *OTNSwitch 1*, onde os sinais C4 e C5 (ODU0) são multiplexados em ODU1 que, juntamente com os sinais C1 (ODU2), C2 (ODU3) e C3 (ODU1), são multiplexados em uma ODU4. Seguindo a hierarquia de camadas OTN, a ODU4 contendo os sinais clientes multiplexados, é mapeada em uma OTU4, que é transmitida por um canal óptico (OCH), associado a um comprimento de onda. É possível verificar que com apenas um comprimento de onda no enlace entre o *OTNSwitch 1* e *OTNSwitch 2*, cinco clientes de taxas distintas foram transmitidos.

Dando prosseguimento ao exemplo, no *OTNSwitch 2* ocorre uma conversão O-E-O para que, convertendo o sinal do domínio óptico para o domínio elétrico, seja possível realizar a demultiplexação dos sinais multiplexados nos comprimentos de

onda, tornando possível o *Add/Drop* de sinais como mostra a Figura 3-10. A ODU4 é demultiplexada e a ODU1, contendo os sinais C4 e C5, também é demultiplexada para entrega dos sinais. O sinal C6 (ODU2) é multiplexado juntamente com os sinais C1 e C3 em uma ODU3, que por sua vez é multiplexada com o sinal C2 em uma ODU4 para transmissão (Figura 3-9). No *OTNSwitch 3*, a ODU4 é demultiplexada para extração do sinal C2, enquanto a ODU3 contendo os sinais C1, C3 e C6 realiza um *passthrough* pelo nó, não sendo necessário a realização de demultiplexação. No *OTNSwitch 4*, a ODU3 é demultiplexada para extração e entrega dos sinais C1, C3 e C6 aos seus respectivos destinos.

No caso de redes OTN, suas interfaces são capazes de realizar comutação de dois tipos de ISC: TDM (ODUs), LSC (OCH). Os LSPs são estabelecidos pelo plano de controle entre interfaces de mesmo ISC. Os limites de um LSP TDM estão restritos ao início e fim de uma trilha ODU, enquanto os limites de um LSP LSC estão limitados ao início e fim da trilha OCH (Favoreto F. P., 2009). Os LSPs ODU e OCH apresentam uma hierarquia entre eles. Um LSP OCH pode servir de túnel para transporte de vários LSPs ODU, assim como um LSP de ODU de alta ordem pode servir de túnel para transportar LSPs ODU de baixa ordem. Para exemplificar, a Figura 3-11 detalha os LSPs estabelecidos na rede para transporte dos clientes.

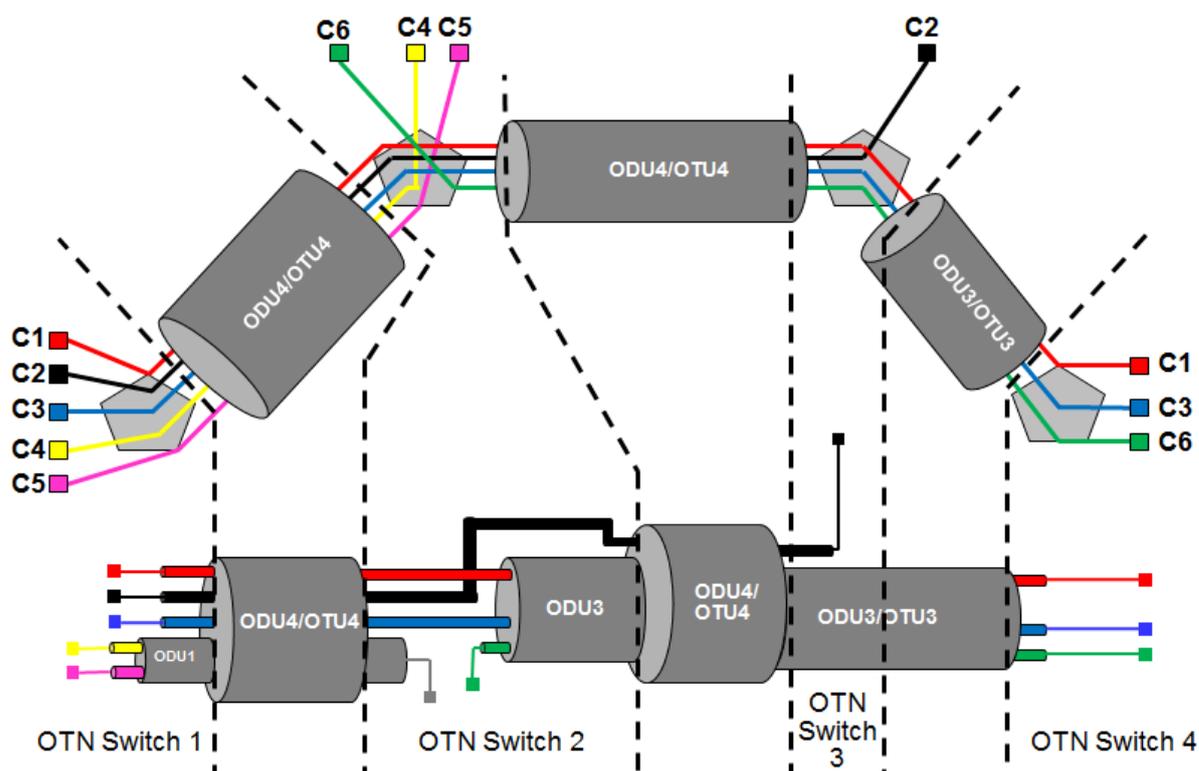


Figura 3-9 - Grooming no OTNSwitch.

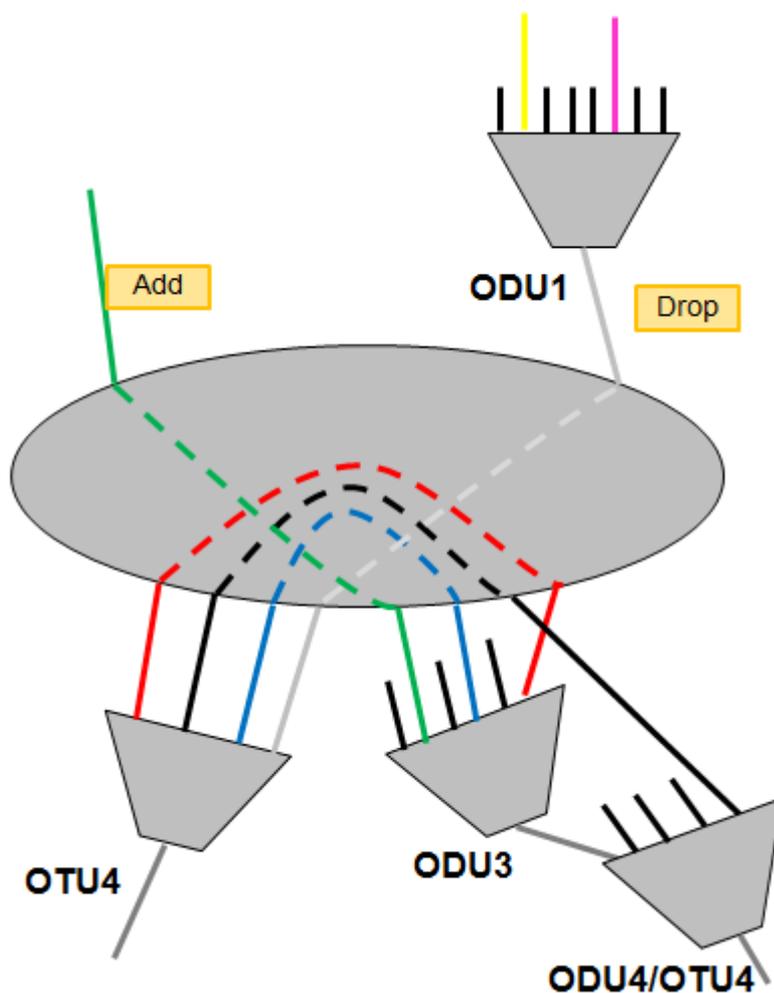


Figura 3-10 - Add/Drop: Detalhe.

No exemplo da Figura 3-8, ocorre *Add/Drop* em todos os nós da rede. Como consequência, o OCH é terminado em cada nó, juntamente com a ODU4 utilizada como túnel para transporte dos sinais clientes. Assim, conforme ilustrado na Figura 3-11, em cada enlace da rede existe um OCH LSP servindo de túnel para o ODU4 LSP. No enlace entre o *OTNSwitch* 1 e 2 pode ser observado a hierarquia de LSPs. Os LSPs de sinais clientes ODU0 LSP (C4) e ODU0 LSP (C5) são aninhados no ODU2 LSP1, que por sua vez é aninhado junto com os outros ODU LSPs para transporte de sinal cliente (C1, C2 e C3) no ODU4 LSP1, de alta ordem. Por fim, o ODU4 LSP1 é aninhado ao OCH LSP1. É importante ressaltar que os LSPs demonstrados no exemplo não são uma regra, o plano de controle pode alocar os LSPs de acordo com alguns fatores como políticas, restrições de roteamento e capacidades de multiplexação disponível nas interfaces do equipamento etc.

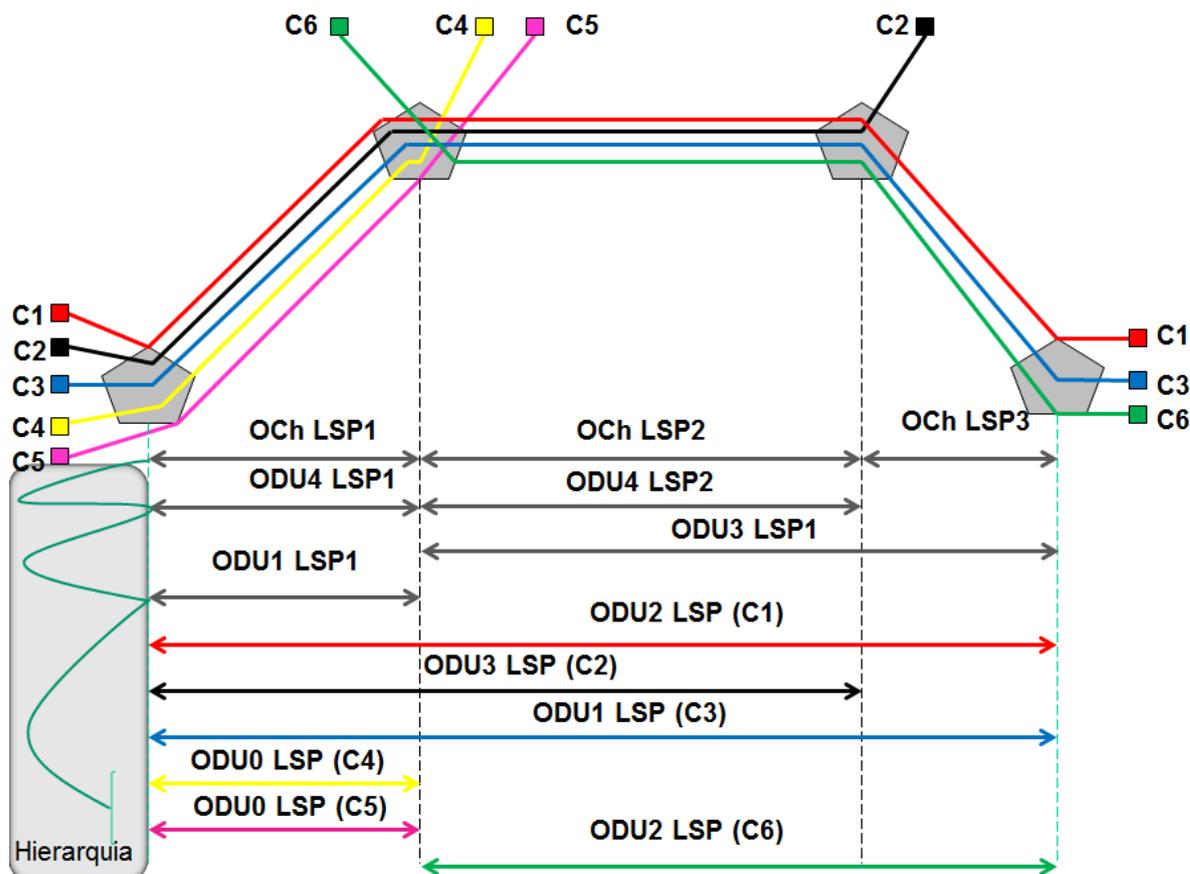


Figura 3-11 - Detalhamento dos LSPs estabelecidos.

Portanto, configurar um LSP em uma rede OTN consiste em utilizar a arquitetura de plano de controle desenvolvida nesta dissertação para o *OTNSwitch*. A grande contribuição da arquitetura e dos processos por ela desempenhados é utilizar os conceitos de ASON/GMPLS para gerenciar os recursos de comutação de um equipamento físico e melhor utilizar seus recursos dado uma demanda de serviço feito à rede. Dessa forma, os conceitos e processos são capazes de atuar sobre o equipamento e configurar conexões utilizando o roteamento, sinalização, alocação de recursos e configuração do equipamento.

4 IMPLEMENTAÇÃO

Este capítulo tem por objetivo apresentar como a arquitetura de plano de controle integrada ao equipamento *OTNSwitch* é modelada. A modelagem é desenvolvida no simulador de eventos discretos OMNeT++ para prova de conceito da arquitetura de plano de controle apresentada no capítulo 3, no que diz respeito ao estabelecimento de LSPs hierárquicos em redes de núcleo compostas de equipamentos *OTNSwitch*.

4.1 OMNeT++: SIMULAÇÃO DE REDES OTN

Esta dissertação é um trabalho desenvolvido em um grupo de pesquisa e consiste na continuação de trabalhos anteriores. Portanto, a ferramenta utilizada para o desenvolvimento segue a escolha feita pelos desenvolvimentos anteriores. O simulador utilizado para o desenvolvimento dos modelos propostos é o OMNeT++. Em (Favoreto F. P., 2009) é abordada a justificativa pela escolha do OMNeT++, assim como comparações do OMNeT++ com outras ferramentas de simulação.

O OMNeT++ é um simulador de eventos discretos, modular e orientado a objeto (Varga, OMNeT++ User Manual, 2014). Simulações de eventos discretos são utilizadas para modelar sistemas que mudam o seu estado em pontos discretos no tempo a partir da ocorrência de eventos, por exemplo, uma rede de pacotes. Nessa categoria de simulação as execuções são agendadas na forma de eventos que são armazenados em uma fila com prioridades. Cada evento possui um tempo de execução, que são tratados de acordo com a prioridade de cada um. O OMNeT++ sendo utilizado em várias áreas como: sistemas distribuídos, validação de arquiteturas de hardware, modelagem de redes de comunicação, modelagem de protocolos, entre outros.

Sua arquitetura de simulação oferece um ambiente capaz de realizar a interação entre módulos que possuem seu comportamento descrito em C++. Por ser orientado a objeto, um módulo pode ser reutilizado e combinado de várias maneiras diferentes, como peças de Lego (Varga, OMNeT++ User Manual, 2014).

Módulos podem ser conectados uns aos outros através de *gates*, e podem ser combinados de forma hierarquizada para formarem módulos compostos (Figura 4-1), onde um módulo composto engloba mais de um módulo em seu interior (módulo simples), e o comportamento do módulo composto é consequência do comportamento e da interação dos módulos em seu interior.

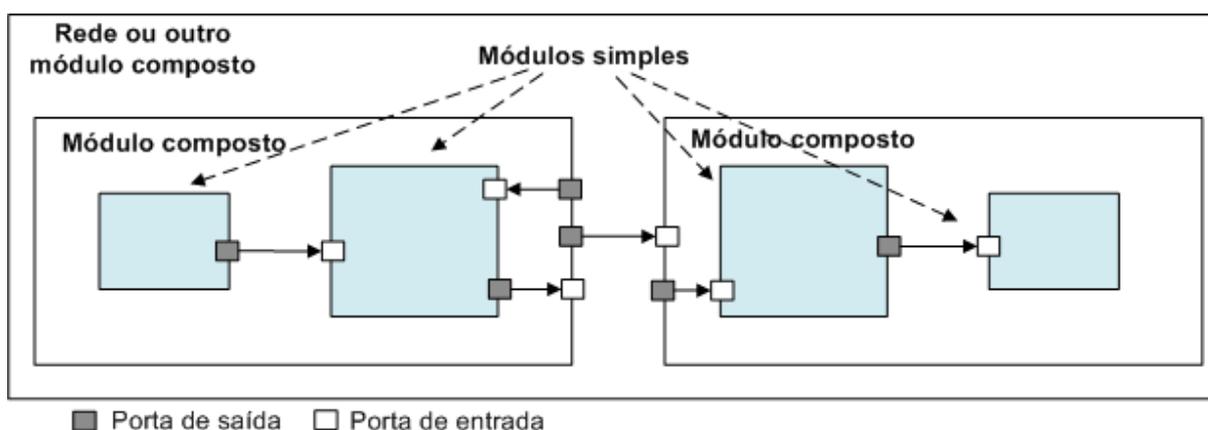


Figura 4-1 - Hierarquia de módulos no OMNeT++. (Perez, 2005)

Os módulos se comunicam através de mensagens trocadas pelos *gates* dos módulos, mensagens essas que são definidas pela modelagem a ser simulada, podendo carregar qualquer estrutura de informação pertinente à simulação. As mensagens trocadas entre os módulos podem representar quadros ou pacotes em uma rede de computadores, tarefas numa fila ou qualquer outro tipo de entidades móveis. As estruturas de dados de uma mensagem são escritas em um arquivo próprio (.msg) que, quando compilado, dá origem a uma classe C++ com métodos responsáveis pelo processamento da mensagem, *Gets* e *sets*, por exemplo.

Os *gates* dos módulos são ligados por canais de conexão, objetos que possuem um comportamento que simula um meio físico de transmissão. Podem ser configurados para inserir atrasos, erros, e capacidade de transmissão.

Especificados os comportamentos dos módulos simples e compostos, *gates*, e mensagens a serem trocadas, o OMNeT++ oferece uma linguagem de descrição de rede (NED – *NEtwork Description*) para a composição da topologia, que consiste na conexão dos módulos desenvolvidos para simulação.

4.2 MODELAGEM DA ARQUITETURA

O grupo de pesquisa em redes ópticas do LABTEL vem nos últimos anos desenvolvendo um *framework* de simulação de redes OTN, com o intuito de criar uma ferramenta para simular redes em escalas reais, de acordo com os aspectos da arquitetura descrita nas recomendações da ITU-T. Uma referência desse *framework* em desenvolvimento pelo grupo de pesquisa pode ser encontrada na seção 1.5, onde são descritos vários trabalhos que vêm sendo desenvolvidos acrescentando módulos dos planos de transporte, gerência e controle, que juntos formam equipamentos e redes. As redes modeladas são utilizadas como prova de conceito das propostas apresentadas.

A arquitetura do *OTNSwitch* à qual esta dissertação se refere é modelada no *framework* de simulação (Dilem, Favoreto, Tessinari, Bueloni, & Garcia, 2013), assim como a arquitetura de gerência descrita (Favoreto R. C., 2014). O plano de controle proposto é modelado utilizando o *framework* de simulação como prova de conceito, atuando sobre o equipamento *OTNSwitch* por intermédio da arquitetura de gerência desenvolvida para o mesmo.

4.2.1 Arquitetura de Plano de Controle

A modelagem da arquitetura de plano de controle no OMNeT++ segue a proposta de arquitetura integrada à arquitetura de gerência do *OTNSwitch* apresentada na seção 3.1. A arquitetura de gerência modelada no OMNeT++ contém o módulo de plano de controle (*Control Plane Functions*). Toda a arquitetura de plano de controle modelada nesta dissertação foi desenvolvida interna a esse módulo. A Figura 4-2 detalha os módulos que compõem a arquitetura e as suas respectivas ligações.

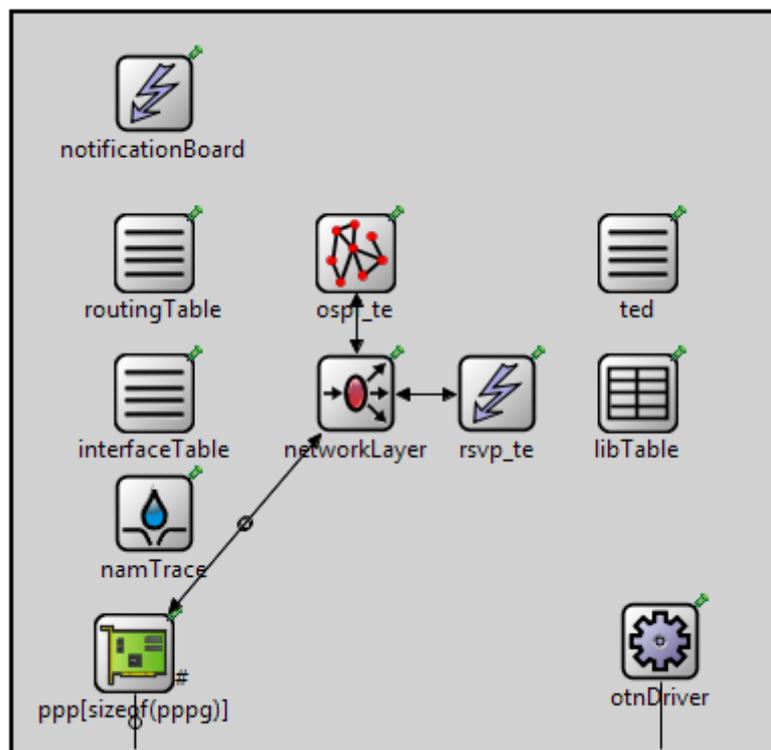


Figura 4-2 - *Control Plane Function*: Arquitetura de plano de controle.

Cada componente da arquitetura é um módulo simples do OMNeT++, e a integração de todos os módulos desempenham a função controlador local do equipamento, que pela troca de mensagens dos protocolos com os controladores adjacentes formam a arquitetura de plano de controle distribuída.

A RFC 3945 (Mannie, 2004) especifica que a troca de mensagens dos protocolos de plano de controle do GMPLS necessita ser realizada sobre uma rede IP. Para atender tal demanda, utilizou-se o roteador IP do INET como base de desenvolvimento da arquitetura. O INET é um *framework* de simulação de redes IP disponível para o OMNeT++ (Varga & Acadêmica, INET Framework main page, 2014) que conta com toda a infraestrutura de comunicação IP modelada, sendo aproveitado a estrutura IP para troca de mensagens dos protocolos GMPLS.

A camada de rede (*Network Layer*) fornece uma API para comunicação IP; dessa forma os protocolos são modelados como aplicações que são executadas sobre a camada de rede, e utilizam uma porta para comunicação com seus adjacentes. A camada de rede, junto com as interfaces de rede, se encarrega de fazer o roteamento e entrega de mensagens às aplicações de maneira correta, simulando assim a rede DCN.

Essa modelagem de controlador GMPLS utilizando o INET é apresentada em (Favoreto F. P., 2009), onde uma proposta de plano de controle para redes OTN é feita, porém o plano de controle desenvolvido até então trata apenas da hierarquia óptica OTN, sendo capaz de estabelecer apenas LSPs em nível óptico (OCH LSP). Esta dissertação propõe expandir o plano de controle desenvolvido anteriormente, integrando o plano de controle à arquitetura do equipamento *OTNSwitch*, e modelando os processos de plano de controle para o estabelecimento de LSPs hierárquicos em nível óptico e elétrico, aproveitando os recursos de *grooming* do oferecidos pelo equipamento.

O grande esforço de implementação desta dissertação se dá nos módulos relativos ao GMPLS, a saber, **rsvp-te**, **ospf-te**, **ted** e **libTable**. O *framework* INET apresenta um modelo de simulação para o MPLS, que foram utilizados como base para o desenvolvimento desta dissertação. Os módulos do INET foram aproveitados, no que diz respeito à estrutura de implementação e máquina de estados dos protocolos, uma vez que não é escopo desta dissertação implementar os protocolos, e sim propor uma adaptação em seus processos para que eles operem no cenário de redes OTN, principalmente no estabelecimento de LSPs hierárquicos. Para isso foi necessário implementar os processos descritos nos Apêndice I e Apêndice II referentes ao processamento das mensagens de sinalização e reserva de recursos, pois deve ser levado em conta a hierarquização de LSPs.

Outro grande esforço foi realizado na comunicação entre plano de controle e equipamento, necessitando de adaptações na gerência de configuração e MIB, para que os comandos do plano de controle fossem entendidos e realizados pelo equipamento, visando atender ao diagrama de sequência do processo de sinalização e configuração do equipamento (Apêndice III).

O módulo **otnDriver** é responsável por identificar os tipos, capacidades e quantidade de interfaces NIC e OIC do *OTNSwitch*. Essas informações ficam armazenadas no **ted** e são utilizadas para calcular a capacidade dos TE *links* e para alocação de recursos no processo de sinalização do RSVP-TE.

O módulo **ospf_te** distribui as informações dos TE *links* através da troca de mensagens LSA utilizando a DCN, atualizando a tabela de rotas (**routing table**) e o

ted de cada controlador para que todos tenham uma visão atualizada de todos os TE *links* da rede.

O módulo **rsvp_te** é responsável por realizar o processo de sinalização na rede e realizar a alocação de recursos. Esse módulo é adaptado para que seja possível a alocação de LSPs hierárquicos em *OTNSwitch*, principalmente no processo de alocação de recursos, proposto na seção 3.1.1.4. Cada nó que determina o nó inicial de uma chamada contém um arquivo XML (Apêndice IV) que contém os parâmetros de uma sessão *rsvp*. Dentre esses parâmetros podem ser destacados: endereço de destino, CIC de origem e destino, tipo de sinal (ODU0, ODU1, ODU2...) e id do LSP.

Cada *tag "path"* presente no XML desencadeia um processo de sinalização para reserva de recursos na rede, determinado pela troca de mensagens *path* e *resv*. Os parâmetros são transmitidos salto a salto pela mensagem *path*, que são determinados pela tabela de rota, sempre atualizada com o estado atual da rede pelo **ospf_te**, pelo método de roteamento *hop-by-hop*. Através do processamento da mensagem *path* e *resv* (seção 3.1.1.3), é possível alocar os recursos necessários para atender a demanda, caso existam, seguindo o processo de alocação de recursos descrito na seção 3.1.1.4.

A alocação de recursos ocorre através do módulo **libTable**. Ao processar a mensagem *resv*, os recursos pré-alocados devem ser alocados. Para isso, os *labels* referentes ao recurso são instalados no **libTable**, evitando que sejam utilizados novamente. O módulo **libTable** informa os recursos alocados e o **otnDriver** realiza um pedido a gerência de configuração para alocar fisicamente os recursos no equipamento, seguindo o processo descrito na seção 3.1.1.5 pelas primitivas propostas.

A Figura 4-3 e a Figura 4-4 ilustram a sequência de eventos realizados pelo plano de controle durante a sinalização de *path* e *resv* respectivamente.

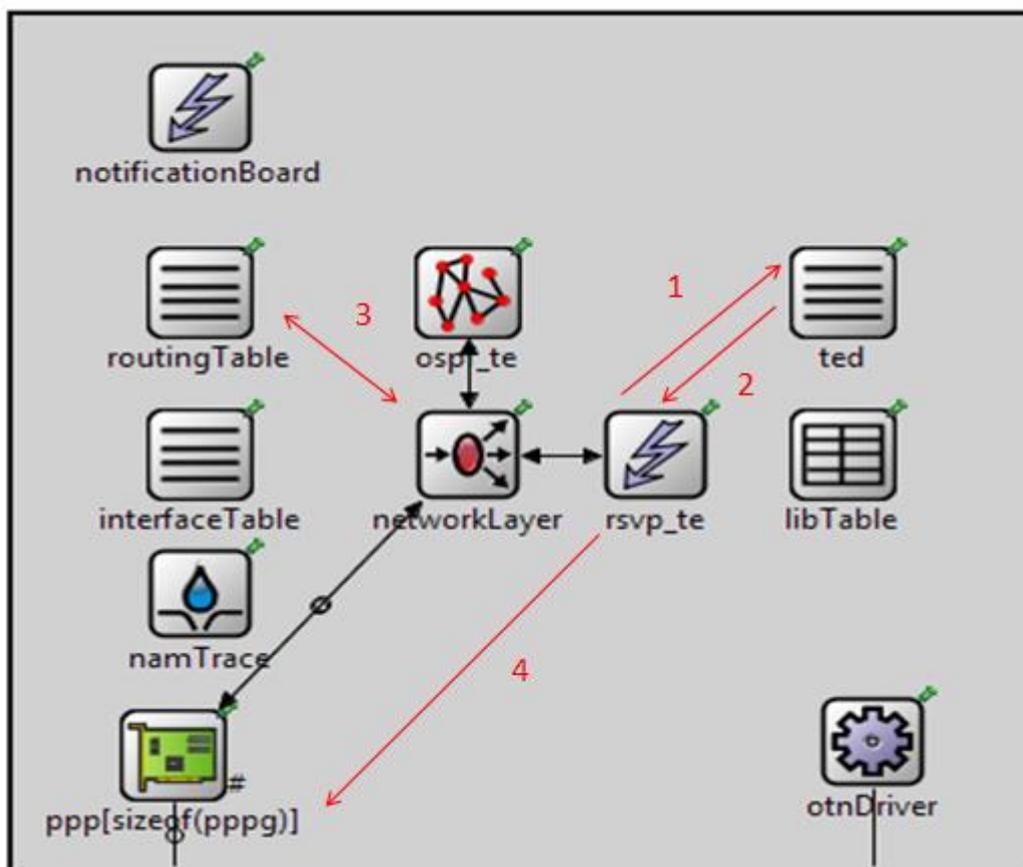


Figura 4-3 – Sequência de ações durante o processo de *path*.

A Figura 4-3 ilustra o processo de *path*. Ao receber uma mensagem *path*, o módulo **rsvp_te** verifica os parâmetros da chamada sendo transmitidos na mensagem, ou seja, qual o destino, tipo de sinal, a interface de destino e os demais parâmetros contidos na mensagem. Sabendo da demanda de recursos da chamada, o **rsvp_te** requisita ao **ted** os recursos necessários para atender a demanda (1). O **ted** verifica em sua base de dados quais as interfaces que melhor atendem a demanda, devolvendo o conjunto de interfaces necessárias para aquela demanda (2), seguindo o processo proposto na seção 3.1.1.4. Os recursos são pré-alocados localmente, criando um estado de *path state block* para os recursos da chamada. O próximo nó do caminho é determinado pela tabela de rotas (3), para que a mensagem *path* com os parâmetros da chamada seja transmitida ao mesmo pela DCN (4). O processo se segue repetidamente pelos nós do caminho até que atinja o nó de destino, desencadeando o processo de *resv* (Figura 4-4).

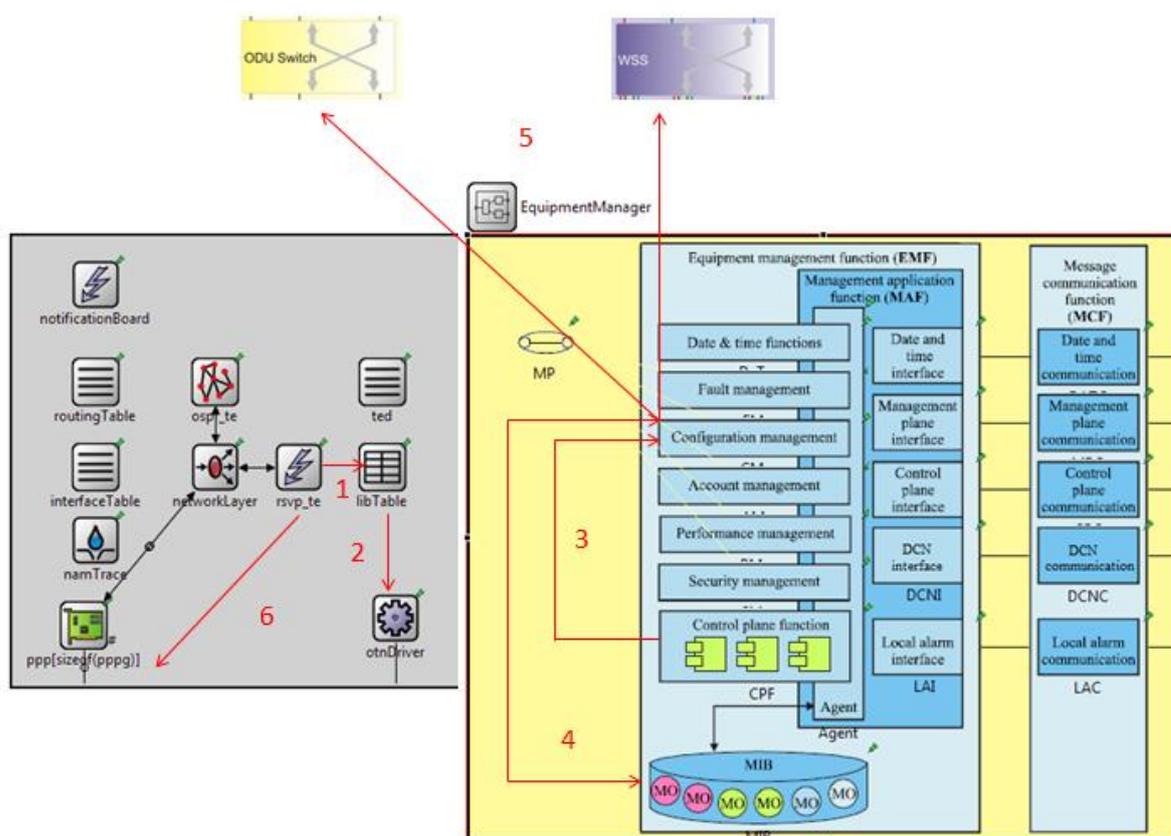


Figura 4-4 - Sequência de ações durante o processo de *resv*.

Ao atingir o nó de destino, os recursos são alocados fisicamente. O **rsvp_te** instala os *labels* relativos aos recursos pré-alocados na **libTable** (1). Ao instalar os *labels*, é gerado uma requisição ao **otnDriver** para que os recursos sejam fisicamente alocados (2). O **otnDriver** faz a requisição de configuração do equipamento para a gerência de configuração (3), que busca os parâmetros necessários à configuração na MIB (4) e configura as matrizes de *cross* conexão elétrica (*ODU Switch*) e óptica (*WSS*) (5). Ao final do processo, uma mensagem *resv* é disparada ao nó anterior no caminho, repetindo o processo até que o nó inicial seja alcançado (6). Ao final dos processos *path* e *resv*, o caminho se encontra configurado para transmissão.

O próximo capítulo exhibe cenários de testes modelados no OMNeT++ utilizando o *framework* de simulação de redes OTN. O plano de controle é testado em cenários de rede de núcleo baseada em *OTNSwitch* e os resultados obtidos são analisados.

5 VALIDAÇÃO

Este capítulo tem como proposta validar a arquitetura e os procedimentos de alocação de recursos utilizando LSPs hierárquicos propostos nesta dissertação. Para atingir o objetivo, o plano de controle é testado em topologias de rede de núcleo atuando no equipamento *OTNSwitch*.

5.1 REDES DE TESTE

Para validar a proposta desta dissertação, os códigos implementados e os módulos, são utilizados dois cenários de testes, configurados em topologias típicas de redes de núcleo (mista e anel), submetendo o plano de controle em topologias de rede distintas. O primeiro cenário conta com equipamentos *OTNSwitch* com NICs configuradas para realizar um nível de multiplexação TDM, multiplexando até 10 sinais ODU2 (10Gbps) em 1 sinal ODU4 (100Gbps). O segundo cenário trabalha com um modelo de NIC mais elaborado, capaz de realizar multiplexação TDM em dois níveis, possibilitando a multiplexação de sinais ODU1 (2,5Gbps), ODU2 (10Gbps) e ODU3 (40Gbps) diretamente em um ODU4 (100Gbps), ou sendo multiplexados anteriormente em um ODU3 para posteriormente ser multiplexado em ODU4 juntamente com outros sinais que são multiplexados diretamente. A única regra para esse tipo de NIC é que a soma das taxas dos sinais de entrada não ultrapasse a taxa do sinal de saída, no caso 100Gbps.

Os cenários são modelados utilizando os arquivos NED do equipamento *OTNSwitch* desenvolvido no *framework* de simulação de redes OTN, com a arquitetura de plano de controle em seu interior, modelado na função de plano de controle na gerência do equipamento. Os equipamentos são interligados através de um canal óptico modelado no OMNeT++ em (Favoreto F. P., 2009).

Os testes consistem em verificar se o plano de controle proposto é capaz de:

1. Mapear as capacidades de comutação do equipamento;

2. Trocar mensagens de sinalização e roteamento através da organização proposta para o controlador do *OTNSwitch*;
3. Alocar os recursos e configurar o equipamento de acordo com os processos propostos no Capítulo 3, aproveitando as capacidades de recursos já em utilização;
4. Proporcionar a correta comunicação entre os clientes da rede.

Na fase inicial dos testes, todos os equipamentos encontram-se sem configuração de comutação, causando um bloqueio de todo o tráfego na rede. Em uma segunda etapa, o plano de controle dá início à troca de mensagens visando estabelecer a adjacência entre os controladores. O protocolo OSPF trocará informações de roteamento atualizando todos os nós com a topologia da rede. O RSVP iniciará o processo de sinalização, alocando recursos e configurando os equipamentos de acordo com as demandas dos clientes. Ao final da sinalização, estabelecimento de recursos e configuração dos equipamentos, espera-se que os clientes consigam realizar a comunicação fim-a-fim.

Para análise de resultados, é verificado se o plano de controle atende a todas as requisições, uma vez que existem recursos para prover conexão para todas as chamadas sem bloqueios. Outra análise a ser realizada é a forma de alocação de recursos que o plano de controle, verificando a hierarquia de LSPs montadas pelo plano de controle.

5.1.1 Cenário de Teste 1 – Rede de Topologia Mista

No primeiro cenário de teste, o plano de controle é avaliado para uma rede de topologia mista, como é mostrado na Figura 5-1. O tráfego na rede é inserido através de clientes, que geram tráfego a ser transportado pela rede até seu destino final. No cenário, os clientes xA requisita uma chamada ao cliente xB. Por exemplo, o cliente10G1A realiza uma requisição de chamada até o cliente10G1B.

Para princípios de identificação e roteamento, o controlador de plano de controle do *OTNSwitch* possui um endereço IP. No caso do cenário 1, os equipamentos possuem os seguintes endereços:

- OTNSwitch 1: 10.1.1.1;
- OTNSwitch 2: 10.1.2.1;
- OTNSwitch 3: 10.1.3.1;
- OTNSwitch 4: 10.1.4.1;
- OTNSwitch 5: 10.1.5.1;
- OTNSwitch 6: 10.1.6.1;

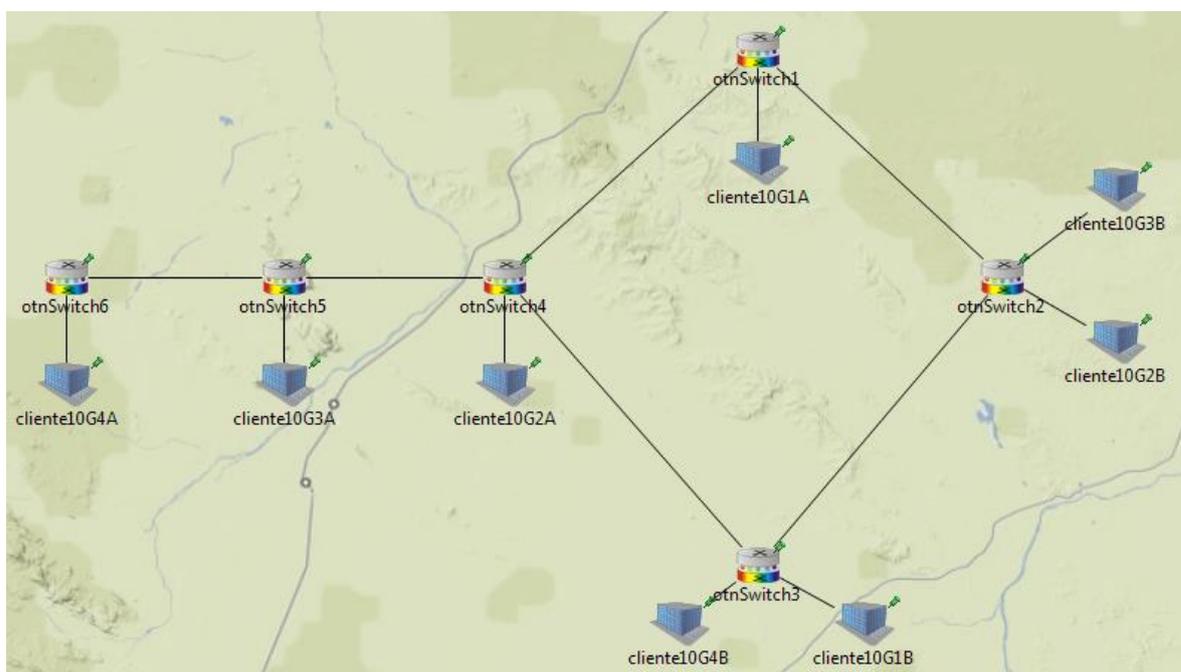


Figura 5-1 - Cenário de teste 1: Topologia Mista.

No início da simulação, todos os equipamentos *OTNSwitch* da rede possuem suas matrizes de comutação, tanto óptica como elétrica, sem configuração, bloqueando todo o tráfego transmitido pelos clientes da rede (Figura 5-2).

```

** Event #11822 T=0.5 teste_OtnSwitch4.otnSwitch5.oduSwitch.cODU_C (cODU_C,
Message Chegou para ser comutado no ODU_C. Informacoes:
Gate IN: 3
Imprimindo a Matriz de Comutacao:## Connection Matrix at oduSwitch ##
[cODU C] Signal Blocked (Gate): (3). ODU frame deleted
** Event #11823 T=0.5 teste_OtnSwitch4.otnSwitch3.oduSwitch.cODU_C (cODU_C,

```

Figura 5-2 - Bloqueio de sinal pela matriz sem configuração de comutação.

Os controladores iniciam os processos realizados pelo plano de controle mapeando os TE *links* que são terminados localmente e os recursos disponíveis no equipamento, preenchendo a base de dados do TED. A Figura 5-3 ilustra o arquivo

de *log* do TED dos equipamentos *OTNSwitch 1* e *OTNSwitch 2* após o mapeamento dos TE *links* e dos recursos. São armazenadas as interfaces NICs e OICs assim com suas respectivas capacidades, bem como os TE *links*, explicitando o máximo e mínimo de capacidade que podem ser alocados entre cada origem e destino que definem o TE *link*. Os valores de banda disponível são representados em Gbps. Por exemplo, ente os nós 10.1.2.1 (*OTNSwitch 2*) e 10.1.1.1 (*OTNSwitch 1*) pode ser alocado uma capacidade máxima de 200Gbps e mínima de 1.25Gbps, a granularidade mínima comutada por redes OTN.

```
Entradas do TED após inicialização do módulo teste_OtnSwitch4.otnSwitch1.cc.Manager.CPF.gted:
Network Interface Card (Nic): 0
Max. Bandwidth: 100

Network Interface Card (Nic): 1
Max. Bandwidth: 100

Optical Interface Card (Oic): 0
Num. Wavelength: 5

Optical Interface Card (Oic): 1
Num. Wavelength: 5

10.1.1.1 --> 10.1.2.1, maxBandwidth=200, minResvBandwidth=1.25

10.1.1.1 --> 10.1.4.1, maxBandwidth=200, minResvBandwidth=1.25

-----

Entradas do TED após inicialização do módulo teste_OtnSwitch4.otnSwitch2.cc.Manager.CPF.gted:
Network Interface Card (Nic): 0
Max. Bandwidth: 100

Network Interface Card (Nic): 1
Max. Bandwidth: 100

Optical Interface Card (Oic): 0
Num. Wavelength: 5

Optical Interface Card (Oic): 1
Num. Wavelength: 5

10.1.2.1 --> 10.1.1.1, maxBandwidth=200, minResvBandwidth=1.25

10.1.2.1 --> 10.1.3.1, maxBandwidth=200, minResvBandwidth=1.25
```

Figura 5-3 – Cenário 1: Base de dados do TED preenchida após o mapeamento de recursos do equipamento.

A MIB, por sua vez, identifica as ligações das interfaces CICs, NICs e OICs com as matrizes de comutação do equipamento, para determinar em qual porta está ligado cada recurso do equipamento, possibilitando que os comandos de configuração de

conexão do equipamento vindos do plano de controle possam ser realizados, localizando os recursos envolvidos na conexão e efetuando devidamente a ligação entre os recursos nas matrizes.

A Figura 5-4 demonstra o mapeamento. Como exemplo dessa localização de recursos, a porta 32 do *ODUSwitch* encontra-se conectada com a porta 22 da NIC 0, uma interface com capacidade de 100Gbps (ODU4). Assim, quando um comando de configuração de conexão do plano de controle pedir para conectar a porta 22 da NIC 0 com algum outro recurso, a MIB consegue dizer à gerência de configuração que essa porta encontra-se conectada na porta 32 do *ODUSwitch* e que essa porta ainda encontra-se livre para conexão (indicado pelo parâmetro *USED = 0*), parâmetros necessários para a gerência de configurar a conexão da matriz da *ODUSwitch*.

```
|||||
ODU-Switch gate: 32 :
Connected module name: nic[0]
Connected module rate: 4
Connected module gate: 22
USED: 0
|||||
ODU-Switch gate: 33 :
Connected module name: nic[0]
Connected module rate: 4
Connected module gate: 23
USED: 0
|||||
ODU-Switch gate: 34 :
Connected module name: nic[0]
Connected module rate: 4
Connected module gate: 24
USED: 0
|||||
ODU-Switch gate: 35 :
Connected module name: nic[0]
Connected module rate: 4
Connected module gate: 25
USED: 0
|||||
```

Figura 5-4 - Exemplo de log após a localização de recursos realizada pela MIB.

Os protocolos RSVP e OSPF trocam mensagens de operação, definidas pelas especificações correspondentes. O RSVP troca mensagens *hello* pela DCN (Figura 5-5), estabelecendo adjacências RSVP com os controladores vizinhos, permitindo a comunicação entre os controladores.

```

** Event #4330 T=0.12909229941 teste_OtnSwitch4.otnSwitch4
Received RSVP_HELLO
hello sender 10.1.1.1 ACK
local peer 10.1.1.1 is now considered up and running

```

Figura 5-5 – Log gerado pelo OMNeT++: Troca de mensagens *hello* realizada pelo RSVP.

O protocolo OSPF, por sua vez, espalha as informações dos TE *links* (Figura 5-6), atualizando tanto a tabela de roteamento necessária para troca de mensagens do plano de controle, quanto o TED com as informações de todos os outros TE *links* da rede. Como exemplo, a Figura 5-6, mostra o processamento da mensagem *link state* recebida pelo controlador do OTNSwitch 4, onde nova informação de roteamento é encontrada e após a atualização das informações de roteamento no nó, a informação é espalhada aos controladores adjacentes.

```

** Event #4315 T=0.128718966077 teste_OtnSwitch4.otnSwitch4.
Processing message from IP: (LinkStateMsg)link state
received LINK_STATE message from 10.1.1.1
new information found
sending LINK_STATE message to peers
sending LINK_STATE message to 10.1.3.1
sending LINK_STATE message to 10.1.5.1

```

Figura 5-6 - Log gerado pelo OMNeT++: Troca de mensagens *link state* realizada pelo OSPF.

Após a troca de mensagens dos protocolos, o plano de controle encontra-se preparado para dar início ao processo de sinalização com a finalidade de estabelecer LSPs pela rede e atender as demandas dos clientes que necessitam se comunicar.

Durante o processo de sinalização, uma mensagem *path* é transmitida da origem da chamada até seu destino, e pelos nós que essa mensagem passa ela faz com que o plano de controle pré-aloque localmente os recursos necessários para atender à demanda informada pela mensagem *path*. A Figura 5-7 ilustra as o recebimento de uma mensagem *path* pelo OTNSwitch 4 e a criação de um PSB pré-alocando os recursos.

```

** Event #24462 T=1.032986666666 teste_OtnSwitch4
Received PATH_MESSAGE
PATH_MESSAGE: lspid 4
DestAddr:10.1.3.1
created new PSB 4
scheduling PSB 4 refresh 1.032986666666

```

Figura 5-7 - Log gerado pelo OMNeT++: Processamento da mensagem *path*.

Quando a sinalização de *path* atinge seu destino, os recursos são alocados no nó de destino e o controlador de destino dispara a sinalização de *resv* no caminho reverso,

confirmando a alocação dos recursos pré-alocados guardados nos PSBs anteriormente durante a sinalização *path*.

A Figura 5-8 exemplifica uma reserva de recursos que ocorre no *OTNSwitch 3*, reservando os recursos pré-alocados, no caso a porta 2 (*labelOdu*) da NIC 0, porta 2 da NIC 1, comprimento de onda 2 (*labelOch*) da OIC 1 e comprimento de onda 2 da OIC 0.

```

** Event #25355 T=1.048426666666 teste_OtnSwitch4.otnSwitch3.
Configuração por Roteamento Hop-by-hop:
Cic: -1
NicIn: 0
NicOut: 1
LabelOdu: 2
OicIn: 1
OicOut: 0
LabelOchIn: 2
LabelOchOut: 2
Configurando Matrix de Conexão ODU (ODU_C)
Conexão Passthrough
Nic de entrada: nic[0]
Nic de saída: nic[1]
Label de Comutação: 2
Configurando Matrix de Conexão OCH (OCH_C)
Conexão Passthrough
Nic de entrada: nic[0]
Oic de entrada: oic[1]
Nic de saída: nic[1]
Oic de saída: oic[0]
Label de Comutação de Entrada: 2
Label de Comutação de Saída: 2
Configurando Conexão:
Fibra: 0 Comp. Onda: 0
Fibra: 3 Comp. Onda: 2
Fibra: 1 Comp. Onda: 0
Fibra: 2 Comp. Onda: 2

```

Figura 5-8 - Log gerado pelo OMNeT++: Reserva de recursos no equipamento.

Um arquivo de *log* é gerado com todas as trocas de mensagens de sinalização do plano de controle, mostrando todos os recursos alocados durante o caminho. O processo completo para o estabelecimento de um LSP, entre os clientes 1A e 1B é mostrado na Figura 5-9.

```

teste_OtnSwitch4.ontSwitch1.cc.Manager.CPF.grsvp, 1:
enviando mensagem de PATH de 10.1.1.1 para 10.1.4.1
lspId=1, TE link (porta local)=10.1.1.2
...
teste_OtnSwitch4.ontSwitch4.cc.Manager.CPF.grsvp, 1.0164933333333:
recebimento e processamento de mensagem de PATH referente a lspId=1

teste_OtnSwitch4.ontSwitch4.cc.Manager.CPF.grsvp, 1.0164933333333:
enviando mensagem de PATH de 10.1.4.1 para 10.1.3.1
lspId=1, TE link (porta local)=10.1.4.1
...
teste_OtnSwitch4.ontSwitch3.cc.Manager.CPF.grsvp, 1.0329866666666:
recebimento e processamento de mensagem de PATH referente a lspId=1

teste_OtnSwitch4.ontSwitch3.cc.Manager.CPF.grsvp, 1.0329866666666:
instalando rotulo (na gLibTable) para a lspId = 1
formato (cic,nicIn,nicOut,labelOdu,oicIn,oicOut,lambdaIn,lambdaOut)
Downstream: (cic,nicIn,nicOut,labelOdu,oicIn,oicOut,lambdaIn,lambdaOut) = (1,0,-1,1,1,-1,2,-1)

teste_OtnSwitch4.ontSwitch3.cc.Manager.CPF.grsvp, 1.0329866666666:
enviando mensagem de RESV de 10.1.3.1 para 10.1.4.1
lspId=1, TE link (porta remota)=10.1.4.1
...
teste_OtnSwitch4.ontSwitch4.cc.Manager.CPF.grsvp, 1.0484266666666:
instalando rotulo (na gLibTable) para a lspId = 1
formato (cic,nicIn,nicOut,labelOdu,oicIn,oicOut,lambdaIn,lambdaOut)
Downstream: (cic,nicIn,nicOut,labelOdu,oicIn,oicOut,lambdaIn,lambdaOut) = (-1,1,0,1,1,0,1,2)

teste_OtnSwitch4.ontSwitch4.cc.Manager.CPF.grsvp, 1.0484266666666:
enviando mensagem de RESV de 10.1.4.1 para 10.1.1.1
lspId=1, TE link (porta remota)=10.1.1.2
...
teste_OtnSwitch4.ontSwitch1.cc.Manager.CPF.grsvp, 1.0651999999999:
instalando rotulo (na gLibTable) para a lspId = 1
formato (cic,nicIn,nicOut,labelOdu,oicIn,oicOut,lambdaIn,lambdaOut)
Downstream: (cic,nicIn,nicOut,labelOdu,oicIn,oicOut,lambdaIn,lambdaOut) = (1,-1,0,1,-1,1,-1,1)

```

Figura 5-9 – Cenário 1: Partes do arquivo de log para o estabelecimento do LSP de Id = 1.

Como pode ser verificado na Figura 5-9, a mensagem *path* percorre o caminho definido pelo algoritmo de roteamento, no exemplo, *OTNSwitch 1*, *OTNSwitch 4* e *OTNSwitch 3*. A mensagem *resv* reserva os recursos para a chamada, instalando os *labels* na *LibTable* e configurando o equipamento.

De acordo com a Figura 5-9, os seguintes recursos são alocados para o LSP de id = 1:

- *OTNSwitch 1*: CIC 1, porta 1 da NIC 0 e comprimento de onda 1 da OIC 1;
- *OTNSwitch 4*: porta 1 da NIC 1, porta 1 da NIC 0, comprimento de onda 1 da OIC 1 e comprimento de onda 2 da OIC 0;
- *OTNSwitch 3*: CIC 1, porta 1 da NIC 0, comprimento de onda 2 da OIC 1;

Da mesma forma, o plano de controle sinaliza e aloca os recursos para os demais LSPs que transportam o tráfego cliente. Como proposto, o plano de controle sempre aproveita recursos já alocados. Se já existe um comprimento de onda que transporta um ODU4 para o próximo salto do caminho com capacidade disponível, ele aproveita esse recurso já estabelecido para transporte de uma nova requisição.

Para análise da disposição da hierarquia de LSPs organizadas na rede pelo plano de controle, cada sinal cliente gera um *log* contendo um *trace* do caminho informando as interfaces utilizadas pelos equipamentos transpostos pela, assim como as multiplexações sofridas pelo sinal.

É analisado o *log* de dois clientes (1A e 2A) para mostrar como o plano de controle aloca recursos compartilhados, utilizando os mesmos LSPs de alta ordem para o transporte dos diferentes LSPs clientes de baixa ordem.

A Figura 5-10 mostra o *log* gerado quando a mensagem do cliente 1A percorre a rede, desde sua origem (*OTNSwitch 1*) até seu destino (*OTNSwitch 3*). Através do *log* pode ser observado que o sinal ODU2 tem origem na CIC 1. O sinal é encaminhado para a NIC 0, onde passa pelo processo de multiplexação, sendo transmitido em *slots* TDM do ODU4 de saída da NIC 0. O comprimento de onda gerado pela NIC 0 é comutado para o OIC 1 e transmitido pela fibra ao próximo nó, o *OTNSwitch 4*. No *OTNSwitch 4* o sinal é recebido pela OIC 1 e o comprimento de onda é comutado para a NIC 1, que demultiplexa o ODU4. O sinal original ODU2 é comutado para a NIC 0, onde é multiplexado novamente em ODU4 e transmitido pela OIC 0. No último nó do caminho, o *OTNSwitch 3*, o comprimento de onda é recebido pela OIC 1, comutado para a NIC 0 onde a ODU4 é demultiplexada e o sinal ODU2 é entregue à interface cliente CIC 1.

```

----- Client Informations -----
7.8146002364s / id: 14 / Client 10Gbps / cliente10G1A (600)

----- Trace Informations -----

Equipamento: otnSwitch1, enviado via: cic[1], taxa: 2
Equipamento: otnSwitch1, multiplexando: nic[0], taxa de entrada: 2
Equipamento: otnSwitch1, multiplexado: nic[0], taxa de saída: 4
Equipamento: otnSwitch1, enviado via: nic[0], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch1, enviado via: oic[1]
Equipamento: otnSwitch4, recebido via: oic[1]
Equipamento: otnSwitch4, recebido via: nic[1], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch4, demultiplexando: nic[1], taxa de entrada: 4
Equipamento: otnSwitch4, demultiplexando: nic[1], taxa de saída: 2
Equipamento: otnSwitch4, multiplexando: nic[0], taxa de entrada: 2
Equipamento: otnSwitch4, multiplexado: nic[0], taxa de saída: 4
Equipamento: otnSwitch4, enviado via: nic[0], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch4, enviado via: oic[0]
Equipamento: otnSwitch3, recebido via: oic[1]
Equipamento: otnSwitch3, recebido via: nic[0], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch3, demultiplexando: nic[0], taxa de entrada: 4
Equipamento: otnSwitch3, demultiplexando: nic[0], taxa de saída: 2
Equipamento: otnSwitch3, recebido via: cic[1], taxa: 2

```

Figura 5-10 – Cenário 1: Log do Trace gerado pelo cliente 1A.

A mesma análise é feita para o *log* gerado pelo cliente 2A. A Figura 5-11 mostra o *log* da mensagem pelo caminho. O ponto importante a ser observado nesse *log* é que o sinal ODU2 gerado pelo cliente 2A é multiplexado no mesmo recurso de alta ordem utilizado para transporte do cliente 1A no transporte até o *OTNSwitch* 3, a ODU4 da NIC 0 no *OTNSwitch* 4. O plano de controle alocou os recursos dos dois sinais de forma a compartilhar os recursos de alta ordem para transmissão através da multiplexação, ou seja, os LSPs de baixa ordem dos dois clientes utilizam o mesmo LSP de alta ordem para serem transmitidos (destaque na Figura 5-10 e Figura 5-11). Assim, no enlace entre o *OTNSwitch* 3 e 4, é necessário apenas um comprimento de onda para o transporte dos dois clientes.

A Figura 5-12 ilustra a organização dos LSPs estabelecidos pelo plano de controle após a alocação de recursos através da análise dos *logs* gerados pelos demais clientes (Apêndice V). Pode-se notar que o plano de controle utiliza o recurso de alta ordem já estabelecido em cada enlace, no caso o LSP de ODU4 mapeado no LSP de OCH, para o transporte das LSPs de ODU2 que transportam os clientes.

Dessa forma, se o comprimento de onda que liga um nó local ao próximo salto ainda possui capacidade, ele é utilizado para uma nova conexão, fazendo com que a utilização de outro comprimento de onda só seja necessária se o comprimento de onda alocado não possua capacidade, seja a NIC por falta de portas que atendem à taxa ou falta de banda (toda a capacidade está sendo utilizada).

```

----- Client Informations -----

7.8146002364s / id: 18 / Client 10Gbps / cliente10G2A (600)

----- Trace Informations -----

Equipamento: otnSwitch4, enviado via: cic[2], taxa: 2
Equipamento: otnSwitch4, multiplexando: nic[0], taxa de entrada: 2
Equipamento: otnSwitch4, multiplexado: nic[0], taxa de saída: 4
Equipamento: otnSwitch4, enviado via: nic[0], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch4, enviado via: oic[0]
Equipamento: otnSwitch3, recebido via: oic[1]
Equipamento: otnSwitch3, recebido via: nic[0], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch3, demultiplexando: nic[0], taxa de entrada: 4
Equipamento: otnSwitch3, demultiplexando: nic[0], taxa de saída: 2
Equipamento: otnSwitch3, multiplexando: nic[1], taxa de entrada: 2
Equipamento: otnSwitch3, multiplexado: nic[1], taxa de saída: 4
Equipamento: otnSwitch3, enviado via: nic[1], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch3, enviado via: oic[0]
Equipamento: otnSwitch2, recebido via: oic[1]
Equipamento: otnSwitch2, recebido via: nic[0], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch2, demultiplexando: nic[0], taxa de entrada: 4
Equipamento: otnSwitch2, demultiplexando: nic[0], taxa de saída: 2
Equipamento: otnSwitch2, recebido via: cic[2], taxa: 2

```

Figura 5-11 – Cenário 1: Log do Trace gerado pelo cliente 2A.

Como pode ser observado na Figura 5-12, para o cenário proposto, o plano de controle aloca apenas um ODU4 mapeado em um OCH em cada enlace para o transporte dos sinais clientes. Como exemplo dessa alocação pode ser observado o enlace entre os nós 4 e 5. Apenas um comprimento de onda (OCH LSP) transporta 4 LSPs clientes de baixa ordem (ODU2 LSP) multiplexados em um único ODU4 (ODU4 LSP). Assim tem-se um OCH LSP transportando um ODU4 LSP que por sua vez transporta 4 ODU2 LSP, um para cada cliente.

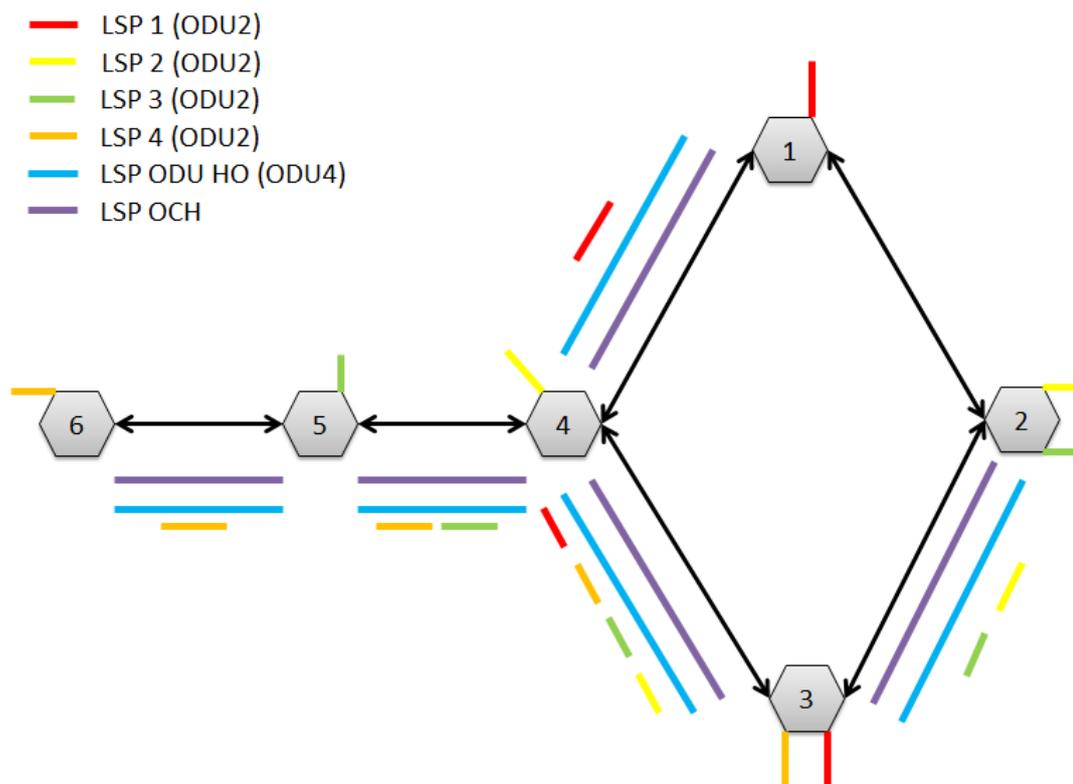


Figura 5-12 – Cenário 1: Alocação dos LSPs pelo plano de controle.

A alocação de LSPs descrita suporta a comunicação dos clientes, como é comprovado nos *logs* gerados por cada cliente, que identifica as mensagens transmitidas e recebidas. A Figura 5-13 mostra como exemplo o *log* gerado pelo cliente 1A.

Pode ser notado que inicialmente o cliente não recebe mensagens, apenas transmite. Isso ocorre devido ao fato do LSP que transporta o cliente não está configurado, fazendo com que as mensagens sejam bloqueadas nas matrizes de comutação elétrica. Quando o plano de controle termina a sinalização e o LSP encontra-se estabelecido, o cliente começa a receber a mensagem de seu referente, no caso o cliente 1B.

```

MSG sent identification: cliente10G1A (54) Time:1.158314021276
MSG sent identification: cliente10G1A (55) Time:1.17050502167
MSG sent identification: cliente10G1A (56) Time:1.182696022064
MSG sent identification: cliente10G1A (57) Time:1.194887022458
MSG sent identification: cliente10G1A (58) Time:1.207078022852
MSG sent identification: cliente10G1A (59) Time:1.219269023246
MSG sent identification: cliente10G1A (60) Time:1.23146002364
      MSG 10GE arrived, MSGid:cliente10G1B (45) Time:1.243482040188
MSG sent identification: cliente10G1A (61) Time:1.243651024034
      MSG 10GE arrived, MSGid:cliente10G1B (46) Time:1.255673040582
MSG sent identification: cliente10G1A (62) Time:1.255842024428
      MSG 10GE arrived, MSGid:cliente10G1B (47) Time:1.267864040976
MSG sent identification: cliente10G1A (63) Time:1.268033024822
      MSG 10GE arrived, MSGid:cliente10G1B (48) Time:1.28005504137
MSG sent identification: cliente10G1A (64) Time:1.280224025216
      MSG 10GE arrived, MSGid:cliente10G1B (49) Time:1.292246041764
MSG sent identification: cliente10G1A (65) Time:1.29241502561
      MSG 10GE arrived, MSGid:cliente10G1B (50) Time:1.304437042158
MSG sent identification: cliente10G1A (66) Time:1.304606026004
      MSG 10GE arrived, MSGid:cliente10G1B (51) Time:1.316628042552
MSG sent identification: cliente10G1A (67) Time:1.316797026398
      MSG 10GE arrived, MSGid:cliente10G1B (52) Time:1.328819042946
MSG sent identification: cliente10G1A (68) Time:1.328988026792

```

Figura 5-13 – Cenário 1: Arquivo de *log* do cliente 1A.

5.1.2 Cenário de Teste 2 – Rede de Topologia Anel

No segundo cenário de teste, o plano de controle é avaliado para uma rede com topologia anel, apresentando equipamentos *OTNSwitch* com NICs com capacidade de multiplexação em dois níveis. O cenário é mostrado na Figura 5-14.



Figura 5-14 - Cenário de teste 2: Topologia Anel.

Da mesma forma do cenário 1, cada controlador de plano de controle recebe um endereço IP para propósitos de identificação e roteamento:

- *OTNSwitch* 1: 10.1.1.1;

- *OTNSwitch* 2: 10.1.2.1;
- *OTNSwitch* 3: 10.1.3.1;
- *OTNSwitch* 4: 10.1.4.1;
- *OTNSwitch* 5: 10.1.5.1;
- *OTNSwitch* 6: 10.1.6.1;

Os clientes 1A, 1B, 2A, e 2B são clientes com demanda de tráfego 10Gbps (ODU2). O cliente 3A, 3B, 5A e 5B apresentam demanda de 40Gbps (ODU3). O cliente 4A e 4B possuem demandas de 2,5Gbps (ODU1).

Uma particularidade do cenário em relação ao cenário 1 é que os clientes 3A, 3B, 5A e 5B se comunicam através de uma sessão RSVP com *switching type* “*Lambda*” portanto espera-se que o plano de controle realize a comutação puramente óptica do sinal que transporta os dois clientes multiplexados, estabelecendo um OCH LSP fim-a-fim entre os nós de origem e destino da sessão.

Da mesma forma que no cenário 1, no início da simulação, o plano de controle realiza o levantamento dos recursos de cada equipamento, mapeando as interfaces NICs e OICs, bem como os TE *Links*. A Figura 5-15 exibe um trecho do arquivo de *log* com as informações armazenadas no TED na simulação.

Após a descoberta de adjacência realizada pelo RSVP, e o espalhamento das informações de roteamento realizada pelo OSPF, que preenche a tabela de rotas com os menores caminhos até o destino, o plano de controle encontra-se no estado de realizar o processo de sinalização, para a configuração dos LSPs utilizados para a troca de informações dos clientes. Da mesma forma que no cenário 1, o plano de controle aloca e configura os recursos para cada demanda na rede. A Figura 5-16 exibe o *log* gerado pelo plano de controle durante o processo de sinalização e alocação de recursos para o LSP de id = 1.

```

Entradas do TED após inicialização do módulo teste_OtnSwitch3.otnSwitch1.cc.Manager.CPF.gted:
Network Interface Card (Nic): 0
Max. Bandwidth: 100

Network Interface Card (Nic): 1
Max. Bandwidth: 100

Optical Interface Card (Oic): 0
Num. Wavelength: 5

Optical Interface Card (Oic): 1
Num. Wavelength: 5

10.1.1.1 --> 10.1.2.1, maxBandwidth=200, minResvBandwidth=1.25

10.1.1.1 --> 10.1.5.1, maxBandwidth=200, minResvBandwidth=1.25

-----

Entradas do TED após inicialização do módulo teste_OtnSwitch3.otnSwitch2.cc.Manager.CPF.gted:
Network Interface Card (Nic): 0
Max. Bandwidth: 100

Network Interface Card (Nic): 1
Max. Bandwidth: 100

Optical Interface Card (Oic): 0
Num. Wavelength: 5

Optical Interface Card (Oic): 1
Num. Wavelength: 5

10.1.2.1 --> 10.1.1.1, maxBandwidth=200, minResvBandwidth=1.25

10.1.2.1 --> 10.1.3.1, maxBandwidth=200, minResvBandwidth=1.25

```

Figura 5-15 - Cenário 2: Base de dados do TED preenchida após o mapeamento de recursos do equipamento.

```

teste_OtnSwitch3.otnSwitch1.cc.Manager.CPF.grsvp, 1:
enviando mensagem de PATH de 10.1.1.1 para 10.1.2.1
lspId=1, TE link (porta local)=10.1.1.1
...
teste_OtnSwitch3.otnSwitch2.cc.Manager.CPF.grsvp, 1.016493333333:
recebimento e processamento de mensagem de PATH referente a lspId=1

teste_OtnSwitch3.otnSwitch2.cc.Manager.CPF.grsvp, 1.016493333333:
instalando rotulo (na gLibTable) para a lspId = 1
formato (cic,nicIn,nicOut,labelOdu,oicIn,oicOut,lambdaIn,lambdaOut)
Downstream: (cic,nicIn,nicOut,labelOdu,oicIn,oicOut,lambdaIn,lambdaOut) = (1,1,-1,52,0,-1,1,-1)

teste_OtnSwitch3.otnSwitch2.cc.Manager.CPF.grsvp, 1.016493333333:
enviando mensagem de RESV de 10.1.2.1 para 10.1.1.1
lspId=1, TE link (porta remota)=10.1.1.1
...
teste_OtnSwitch3.otnSwitch1.cc.Manager.CPF.grsvp, 1.031933333333:
instalando rotulo (na gLibTable) para a lspId = 1
formato (cic,nicIn,nicOut,labelOdu,oicIn,oicOut,lambdaIn,lambdaOut)
Downstream: (cic,nicIn,nicOut,labelOdu,oicIn,oicOut,lambdaIn,lambdaOut) = (1,-1,0,52,-1,0,-1,1)

```

Figura 5-16 – Cenário 2: Partes do arquivo de log para o estabelecimento do LSP de Id = 1.

Através dos *logs* de *trace* gerados para cada cliente é possível ver como o plano de controle organiza os LSPs de forma a aproveitar os recursos da rede. A Figura 5-17

mostra os recursos alocados para o cliente 1A. Como pode ser observado, o cliente ODU2 é multiplexado em ODU3 e posteriormente é multiplexado em um ODU4 na NIC 0 (destaque). O ODU4 é mapeado em um OCH transmitido pela OIC 0 até ser recebido pelo OIC 0 do *OTNSwitch 2*.

```

----- Client Informations -----
7.8146002364s / id: 14 / Client 10Gbps / cliente10G1A (600)

----- Trace Informations -----
Equipamento: otnSwitch1, enviado via: cic[0], taxa: 2
Equipamento: otnSwitch1, multiplexando: nic[0], taxa de entrada: 2
Equipamento: otnSwitch1, multiplexado: nic[0], taxa de saída: 3
Equipamento: otnSwitch1, enviado via: nic[0], taxa: 3
Equipamento: otnSwitch1, multiplexando: nic[0], taxa de entrada: 3
Equipamento: otnSwitch1, multiplexado: nic[0], taxa de saída: 4
Equipamento: otnSwitch1, enviado via: nic[0], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch1, enviado via: oic[0]
Equipamento: otnSwitch2, recebido via: oic[0]
Equipamento: otnSwitch2, recebido via: nic[1], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch2, demultiplexando: nic[1], taxa de entrada: 4
Equipamento: otnSwitch2, demultiplexando: nic[1], taxa de saída: 3
Equipamento: otnSwitch2, recebido via: nic[1], taxa: 3
Equipamento: otnSwitch2, demultiplexando: nic[1], taxa de entrada: 3
Equipamento: otnSwitch2, demultiplexando: nic[1], taxa de saída: 2
Equipamento: otnSwitch2, recebido via: cic[0], taxa: 2

```

Figura 5-17 - Log do Trace gerado pelo cliente 1A.

A Figura 5-18 mostra os recursos alocados para o cliente 2A. Como pode ser observado no destaque da figura, os recursos de alta ordem alocados para o transporte do cliente 2A são os mesmos alocados para o cliente 1A, tanto a NIC 0 como a OIC 0. Ou seja, os sinais compartilham do mesmo recurso de alta ordem através da hierarquização dos LSPs de baixa ordem nos LSPs de alta ordem.

Os clientes 3A e 5A são mapeados em uma sessão RSVP que realiza comutação óptica, assim os dois sinais são multiplexados em um ODU4 que é mapeado em um OCH. O plano de controle aloca um OCH LSP fim-a-fim para o transporte dos dois clientes, realizando apenas a comutação do comprimento de onda nos *OTNSwitchs* intermediários do caminho. O log gerado pelo cliente 5A é mostrado na Figura 5-19,

onde pode ser visto que o nos *OTNSwitchs* intermediários (destaque) o sinal é comutado apenas entre as interfaces ópticas, não sofrendo conversão O – E – O.

```
----- Client Informations -----  
  
7.8146002364s / id: 15 / Client 10Gbps / cliente10G2A (600)  
  
----- Trace Informations -----  
  
Equipamento: otnSwitch1, enviado via: cic[1], taxa: 2  
Equipamento: otnSwitch1, multiplexando: nic[0], taxa de entrada: 2  
Equipamento: otnSwitch1, multiplexado: nic[0], taxa de saída: 3  
Equipamento: otnSwitch1, enviado via: nic[0], taxa: 3  
Equipamento: otnSwitch1, multiplexando: nic[0], taxa de entrada: 3  
Equipamento: otnSwitch1, multiplexado: nic[0], taxa de saída: 4  
Equipamento: otnSwitch1, enviado via: nic[0], taxa: 4  
Equipamento: otnSwitch1, enviado via: oic[0]  
Equipamento: otnSwitch2, recebido via: oic[0]  
Equipamento: otnSwitch2, recebido via: nic[1], taxa: 4  
Equipamento: otnSwitch2, demultiplexando: nic[1], taxa de entrada: 4  
Equipamento: otnSwitch2, demultiplexando: nic[1], taxa de saída: 3  
Equipamento: otnSwitch2, recebido via: nic[1], taxa: 3  
Equipamento: otnSwitch2, demultiplexando: nic[1], taxa de entrada: 3  
Equipamento: otnSwitch2, demultiplexando: nic[1], taxa de saída: 2  
Equipamento: otnSwitch2, multiplexando: nic[0], taxa de entrada: 2  
Equipamento: otnSwitch2, multiplexado: nic[0], taxa de saída: 3  
Equipamento: otnSwitch2, enviado via: nic[0], taxa: 3  
Equipamento: otnSwitch2, multiplexando: nic[0], taxa de entrada: 3  
Equipamento: otnSwitch2, multiplexado: nic[0], taxa de saída: 4  
Equipamento: otnSwitch2, enviado via: nic[0], taxa: 4  
Equipamento: otnSwitch2, enviado via: oic[1]  
Equipamento: otnSwitch3, recebido via: oic[0]  
Equipamento: otnSwitch3, recebido via: nic[0], taxa: 4  
Equipamento: otnSwitch3, demultiplexando: nic[0], taxa de entrada: 4  
Equipamento: otnSwitch3, demultiplexando: nic[0], taxa de saída: 3  
Equipamento: otnSwitch3, recebido via: nic[0], taxa: 3  
Equipamento: otnSwitch3, demultiplexando: nic[0], taxa de entrada: 3  
Equipamento: otnSwitch3, demultiplexando: nic[0], taxa de saída: 2  
Equipamento: otnSwitch3, recebido via: cic[1], taxa: 2
```

Figura 5-18 - Log do Trace gerado pelo cliente 2A.

```

----- Client Informations -----
7.8146002364s / id: 22 / Client 10Gbps / cliente10G5A (600)

----- Trace Informations -----

Equipamento: otnSwitch1, enviado via: cic[2] , taxa: 2
Equipamento: otnSwitch1, multiplexando: nic[1], taxa de entrada: 2
Equipamento: otnSwitch1, multiplexado: nic[1], taxa de saída: 4
Equipamento: otnSwitch1, enviado via: nic[1] , taxa: 4
Equipamento: otnSwitch1, enviado via: oic[1]
Equipamento: otnSwitch5, recebido via: oic[0]
Equipamento: otnSwitch5, enviado via: oic[1]
Equipamento: otnSwitch6, recebido via: oic[0]
Equipamento: otnSwitch6, enviado via: oic[1]
Equipamento: otnSwitch4, recebido via: oic[1]
Equipamento: otnSwitch4, recebido via: nic[1] , taxa: 4
Equipamento: otnSwitch4, demultiplexando: nic[1], taxa de entrada: 4
Equipamento: otnSwitch4, demultiplexando: nic[1], taxa de saída: 2
Equipamento: otnSwitch4, recebido via: cic[2] , taxa: 2

```

Figura 5-19 - Log do Trace gerado pelo cliente 5A.

A Figura 5-20 mostra a organização dos LSPs estabelecidos pelo plano de controle de forma hierárquica. A figura é produzida com base na análise dos *logs* dos demais clientes (Apêndice V).

Pode ser notado que o plano de controle consegue estabelecer os LSPs de forma hierárquica. No arco superior, para cada enlace foi preciso estabelecer apenas um OCH LSP que transporta um ODU4 LSP por enlace. Hierarquizado ao LSP de ODU4, existe um LSP de ODU3 que transporta os clientes de ordem menor que ODU3. No anel inferior foi estabelecido um OCH LSP transportando um ODU4 LSP fim-a-fim, que por sua vez transporta os LSPs dos clientes 3A e 5A. Essa alocação de recurso de alta ordem é suficiente para atender a todas as demandas da rede.

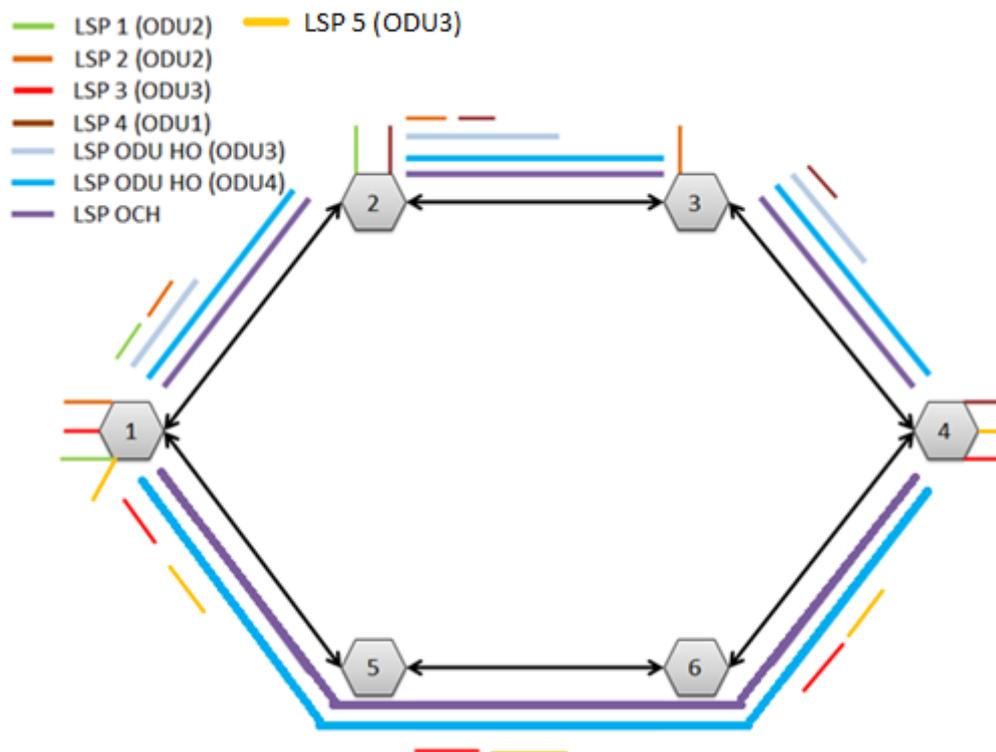


Figura 5-20 – Cenário 2: Alocação dos LSPs pelo plano de controle.

Os LSPs estabelecidos são capazes de realizar o transporte fim-a-fim dos clientes. Como no cenário 1, todos os clientes se comunicam, mostrando a correta configuração realizada pelo plano de controle. A Figura 5-21 demonstra um trecho do arquivo de *log* gerado pelo simulador registrando o envio e o recebimento de mensagens de um cliente, no caso o cliente 1A.

```

MSG sent identification: cliente10G1A (57) Time:1.194887022458
MSG sent identification: cliente10G1A (58) Time:1.207078022852
MSG sent identification: cliente10G1A (59) Time:1.219269023246
    MSG 10GE arrived, MSGid:cliente10G1B (43) Time:1.231291039794
MSG sent identification: cliente10G1A (60) Time:1.23146002364
    MSG 10GE arrived, MSGid:cliente10G1B (44) Time:1.243482040188
MSG sent identification: cliente10G1A (61) Time:1.243651024034
    MSG 10GE arrived, MSGid:cliente10G1B (45) Time:1.255673040582
MSG sent identification: cliente10G1A (62) Time:1.255842024428
    MSG 10GE arrived, MSGid:cliente10G1B (46) Time:1.267864040976
MSG sent identification: cliente10G1A (63) Time:1.268033024822
    MSG 10GE arrived, MSGid:cliente10G1B (47) Time:1.28005504137
MSG sent identification: cliente10G1A (64) Time:1.280224025216
    MSG 10GE arrived, MSGid:cliente10G1B (48) Time:1.292246041764
MSG sent identification: cliente10G1A (65) Time:1.29241502561
    MSG 10GE arrived, MSGid:cliente10G1B (49) Time:1.304437042158
MSG sent identification: cliente10G1A (66) Time:1.304606026004
    MSG 10GE arrived, MSGid:cliente10G1B (50) Time:1.316628042552

```

Figura 5-21 - Cenário 2: Arquivo de log do cliente 1A.

6 CONCLUSÃO

As recomendações da ITU-T que descrevem a tecnologia OTN e as RFCs da IETF que descrevem os protocolos e os processos do plano de controle GMPLS existem para guiar o desenvolvimento de soluções de forma padronizada. Porém há um grande esforço entre entender um conceito descrito nesses documentos e utilizar uma instância desses conceitos voltados a uma tecnologia. É o caso de aplicar o GMPLS na arquitetura de rede OTN, vários conceitos precisam ser mapeados.

Esta dissertação teve como objetivo propor plano de controle para o equipamento *OTNSwitch*, capaz de entender os recursos de *grooming* e comutação do equipamento de forma a realizar o roteamento e sinalização de demandas sobre a rede, realizando as configurações necessárias para o estabelecimento de LSPs hierárquicos, aproveitando a capacidade de multiplexação da tecnologia OTN. A proposta da arquitetura e seus processos de alocação de recursos descritos no Capítulo 3 alcançaram seus objetivos com sucesso, permitindo ao plano de controle alocar LSPs de forma hierárquica e realizar a correta comunicação entre os clientes.

6.1 RESULTADOS

A organização e modelagem do controlador GMPLS junto ao sistema de gerenciamento do equipamento *OTNSwitch* proposto na seção 3.1.1.1 mostrou-se capaz de suportar os processos de roteamento e configuração de caminhos na rede de núcleo. Os controladores de cada equipamento foram capazes de realizar a troca de mensagens pelo canal de controle estabelecido entre os controladores, necessárias para a operação do plano de controle.

A forma de mapeamento de recursos do equipamento tal como proposta na seção 3.1.1.2 mostrou-se satisfatória, permitindo ao plano de controle gerenciar os recursos disponíveis para o atendimento de novas requisições.

Foram necessárias poucas alterações no processo de sinalização de caminho feito pelo RSVP. A grande modificação ocorreu na forma de alocação dos recursos, processo descrito na seção 3.1.1.4, onde foi preciso propor uma forma de alocação baseada no conceito de LSPs hierárquicos onde os recursos de alta ordem que já se encontravam em uso e possuíam capacidade para atender à demanda local durante a criação de um PSB. O processo de alocação de recursos realizado pelo RSVP durante a sinalização de um caminho foi capaz de estabelecer LSPs hierárquicos assim como proposto, impactando diretamente na quantidade menor de recursos de alta ordem utilizados, devido ao fato dos recursos serem aproveitados de uma maneira consciente pelo plano de controle, buscando evitar o desperdício de banda nos mesmos através do uso da multiplexação oferecida pela tecnologia OTN.

Por fim, todo o fluxo de configuração interno ao equipamento proposto na seção 3.1.1.5 utilizando os elementos pertinentes da arquitetura de gerencia do equipamento foi capaz de configurar fisicamente as conexões exigidas pelo plano de controle no plano de transporte. A configuração mostrou-se ser realizada de forma correta, provendo a comunicação entre os clientes da rede através dos LSPs hierárquicos estabelecidos pelo plano de controle.

De uma forma geral, o plano de controle proposto atingiu os objetivos propostos de melhor utilizar para transporte disponível na rede e trazer certo grau de automatização e dinamicidade no atendimento de demandas pela rede.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

A proposta inicial de plano de controle apresentada nesta dissertação visa estabelecer uma base para o plano de controle para redes ópticas de núcleo baseadas em *OTNSwitch*. Outros problemas que não estão no escopo desta dissertação precisam ser abordados e resolvidos para que a plataforma aqui apresentada se torne mais completa e ganhe maturidade:

- Utilizar a correlação de alarmes OTN, descrito na recomendação ITU-T G.798 (ITU-T, 2013) para verificar a integridade dos TE *links*, deixando de

utilizar os enlaces que apresentam falhas no plano de transporte durante o roteamento;

- Estudar a configuração das funções de multiplexação da OTN apresentada na RFC 7062 (Zhang, 2013) para entender como o plano de controle pode configurar as multiplexações de forma automática, de acordo com a demanda, pois as configurações atuais são estáticas, de acordo com o modelo de NIC. A função de configuração das multiplexações trará uma maior flexibilidade ao uso de recursos na rede;
- Adicionar funcionalidades ao plano de controle de forma a tratar situações de falhas na rede, realocando recursos redundantes por caminhos disjuntos (proteção) e/ou realocando recursos no tempo em que a falha ocorre, roteando novamente o tráfego sobre os recursos disponíveis da rede (restauração);
- Aplicar algoritmos e políticas de *diffserv*, alocando recursos que melhor atenda a uma requisição baseada em seu QoS;
- Adaptar o plano de controle para atender a nova geração de redes ópticas, as redes elásticas, onde ocorre um melhor aproveitamento do espectro de transmissão através da flexibilidade da alocação de espectro.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ashwood-Smith, P. (2003). *RFC 3472 - Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Constraint-based Routed Label Distribution Protocol (CRLDP) Extensions*. Internet Engineering Task Force (IETF).
- Barcelos, P. F. (2011). *Dissertação de Mestrado - Análise Arquitetural, Ontológica e Proposta de Modelo de Referência para a Recomendação ITU-T G.805*. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
- Berger, L. (2003). *RFC 3473 - Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Resource ReserVation Protocol-Traffic Engineering (RSVP-TE) Extensions*. Internet Engineering Task Force (IETF).
- Berthold, J., Saleh, A. A., Blair, L., & Simmons, J. M. (Maio de 2008). Optical Networking: Past, Present, and Future. *Journal of Lightwave Technology*, pp. 1104-1118.
- Casellas, R., Muñoz, R., Martínez, R., Vilalta, R., Liu, L., Tsuritani, T., . . . Fernández-Palacios, J. P. (2014). SDN based Provisioning Orchestration of OpenFlow/GMPLS Flexi-grid Networks with a Stateful Hierarchical PCE. *OFC 2014*.
- Chen, S. (june de 2006). An Overview on the Integrated IP Optical Data Control in the Optical Transport Network. *International Conference on Communications Circuits and Systems (2006)*, pp. 1872-1876.
- Ciena. (2011). ASON/GMPLS Control Plane Status. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference*, (pp. 1-46). Los Angeles, CA.
- Dilem, M. B. (2014). *Dissertação de Mestrado - Arquitetura OTN Switch com Funcionalidades de Cross-Conexão e Multiplexação Óptica e Digital em Redes OTN*. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

- Dilem, M. B., Favoreto, R. C., Tessinari, R. S., Bueloni, L. G., & Garcia, A. S. (2013). Proposta de Arquitetura OTN Switch Segundo as Recomendações ITU-T. *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*.
- Dutta, R., Kamal, A. E., & Rouskas, G. N. (2008). *Traffic Grooming for Optical Networks: Foundations, Techniques and Frontiers* (1ª ed., Vol. I). (B. Mukherjee, Ed.) Davis: Springer .
- Farrel, A., & Bryskin, I. (2006). *GMPLS: Architecture and Applications*. San Francisco: Elsevier.
- Favoreto, F. P. (2009). *Dissertação de Mestrado - Plano de Controle GMPLS para Redes Ópticas de Transporte*. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
- Favoreto, R. C. (2014). *Dissertação de Mestrado - Uma Proposta de Solução para Levantamento do Inventário dos Elementos de Rede em Redes Ópticas de Transporte*. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
- Ferrari, F. F. (2011). *Dissertação de Mestrado - Uso do LMP para Descoberta Automática e Gerenciamento de Enlaces em Redes OTN*. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória: PPGEE - UFES.
- Garcia, A. S., Bueloni, L. G., Tessinari, R. S., & Farias, L. J. (2013). Arquiteturas de Plano de Controle para Redes Ópticas de Nova Geração Utilizando LSPs Hierárquicos. Em E. Gurjão, B. Pompeo, L. Farias, A. Klautau, A. Garcia, V. Testoni, . . . R. Tessinari, R. R. Lopes, & W. C. Júnior (Eds.), *Telecomunicações: Teoria, Avanços e Aplicações* (1ª ed., pp. 133-180). Fortaleza, CE: Campinas.
- Guido Maier, A., Lorenzo, C., Dario Giuseppe, C., Achille Pattavina, A., & Péter Szegedi, B. (2008). Quality of Provisioning as an OPEX-related Issue in Research Networks. *IT-NEWS 2008*, pp. 33-39.
- Hu, W., Sun, W., Jin, Y., Guo, W., He, H., & Yi, L. (2011). Sub-Wavelength Switching for Future Internet. *2011 13th International Conference on Transparent Optical Networks (2011)*, pp. 1-4.

- IBM. (1998). *Understanding Optical Communications* (1^a ed., Vol. I). (H. J. Dutton, Ed.) IBM.
- Iniewski, K., McCrosky, C., & Minoli, D. (2008). *Network Infrastructure And Architecture*. New Jersey: Wiley Interscience.
- ITU-T. (2000, março). *G.805: Generic functional architecture of transport networks*. ITU Telecommunication Standardization Sector (ITU-T).
- ITU-T. (2010). *G. 808.1: Generic protection switching - Linear trail and subnetwork protection*. ITU Telecommunication Standardization Sector (ITU-T).
- ITU-T. (2010). *G.7718 - Data over Transport – Generic aspects – Transport network control aspects*. ITU Telecommunication Standardization Sector (ITU-T).
- ITU-T. (2010). *G.874: Management aspects of the optical transport network element*. ITU Telecommunication Standardization Sector (ITU-T).
- ITU-T. (2010). *Optical Transport Networks: from TDM to Packet* (1^a ed., Vol. I). (Y. Maeda, Ed.) ITU-T.
- ITU-T. (Dezembro de 2012). *G.709: Interfaces for the Optical Transport Network (OTN)*. ITU Telecommunication Standardization Sector (ITU-T).
- ITU-T. (2012). *G.7710: Common equipment management function*. ITU Telecommunication Standardization Sector (ITU-T).
- ITU-T. (06 de Junho de 2012). *G.8080 - Architecture for the automatically switched*. ITU Telecommunication Standardization Sector (ITU-T). Fonte: International Telecommunication Union: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.8080-200606-I/en>
- ITU-T. (2012, Novembro). *G.872: Architecture of Optical Transport Networks*. ITU Telecommunication Standardization Sector (ITU-T). Retrieved from International Telecommunication Union: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.872-200111-I/en>
- ITU-T. (Outubro de 2013). *G.798 : Characteristics of optical transport network hierarchy equipment functional blocks*. ITU Telecommunication

Standardization Sector (ITU-T), Telecommunication Standardization Sector of ITU. Fonte: International Telecommunication Union: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.798/en>

Jajszczyk, A. (Julho de 2004). Control Plane for Optical Networks: The ASON Approach. *6th International Conference on Transparent Optical Networks*, pp. 87-90.

Jajszczyk, A. (Fevereiro de 2005). Automatically switched optical networks: benefits and requirements. *Communications Magazine, IEEE*, 43(2), 510-515.

Katib, I., & Medhi, D. (9 de September de 2012). IP/MPLS-over-OTN-over-DWDM Multilayer Networks: An Integrated Three-Layer Capacity Optimization Model, a Heuristic, and a Study. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, pp. 240-253.

Kompella, K. (2005). *RFC 4203 - OSPF Extensions in Support of Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS)*. Internet Engineering Task Force (IETF).

Kompella, K. (2005). *RFC 4205 - Intermediate System to Intermediate System (IS-IS) Extensions in Support of Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS)*. Internet Engineering Task Force (IETF).

Liu, L., Tsuritani, T., & Morita, I. (2012). Experimental Demonstration of OpenFlow/GMPLS Interworking Control Plane for IP/DWDM Multi-Layer Networks. *2012 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, (pp. 1-4). Coventry.

Liu, L., Tsuritani, T., & Morita, I. (23 de June de 2012). From GMPLS to PCE/GMPLS to OpenFlow: How Much Benefit can We Get from the Technical Evolution of Control Plane in Optical Networks? *International Conference on Transparent Optical Networks (2012)*, pp. 1-4.

Maier, M. (2008). *Optical Switching Networks*. Cambridge.

Mannie, E. (2004). *RFC 3945 - Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture*. Internet Engineering Task Force (IETF).

- Ong, L. Y., Roch, E., Shew, S., & Smith, A. (15 de February de 2012). New Technologies and Directions for the Optical Control Plane. *Journal of Lightwave Technology*, pp. 537-547.
- Papadimitriou, D. (2011). *RFC 4328 - Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Extensions for the evolving G.709 Optical Transport Networks Control*. Internet Engineering Task Force (IETF).
- Pasqualini, S. (2005). Influence of GMPLS on network providers' operational expenditures: a quantitative study. *IEEE Comm. Magazine*, 43(7), 28-38.
- Perez, J. (2005). *MQTT Performance Analysis with OMNeT++*. Institut Eurécom, Zurich: IBM Zurich Research Laboratory.
- Ramaswami, R., Sivarajan, k. N., & Sasaki, G. H. (2010). *Optical Networks: A Pratical Perspective* (3^a ed., Vol. I). (D. Clark, Ed.) Burlington: Morgan Kaufmann.
- Tessinari, R. S. (2011). *Dissertação de Mestrado - Integração do Plano de Transporte com os Planos de Controle e de Gerência em Redes OTN: Uma Abordagem Via Simulação*. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória: PPGEE - UFES.
- Vaez-Ghaemi, R. (2010). *Next-Generation Optical Transport Network*. JDSU.
- Varga, A. (2014). *OMNeT++ User Manual*. OpenSim Ltd.
- Varga, A., & Acadêmica, C. (2014). *INET Framework main page*. Acesso em 2014, disponível em Site oficial do INET: <http://inet.omnetpp.org/>
- Zhang, F. (2013). *RFC 7062 - Framework for GMPLS and PCE Control of G.709 Optical Transport Networks*. Internet Engineering Task Force (IETF).

APÊNDICE I

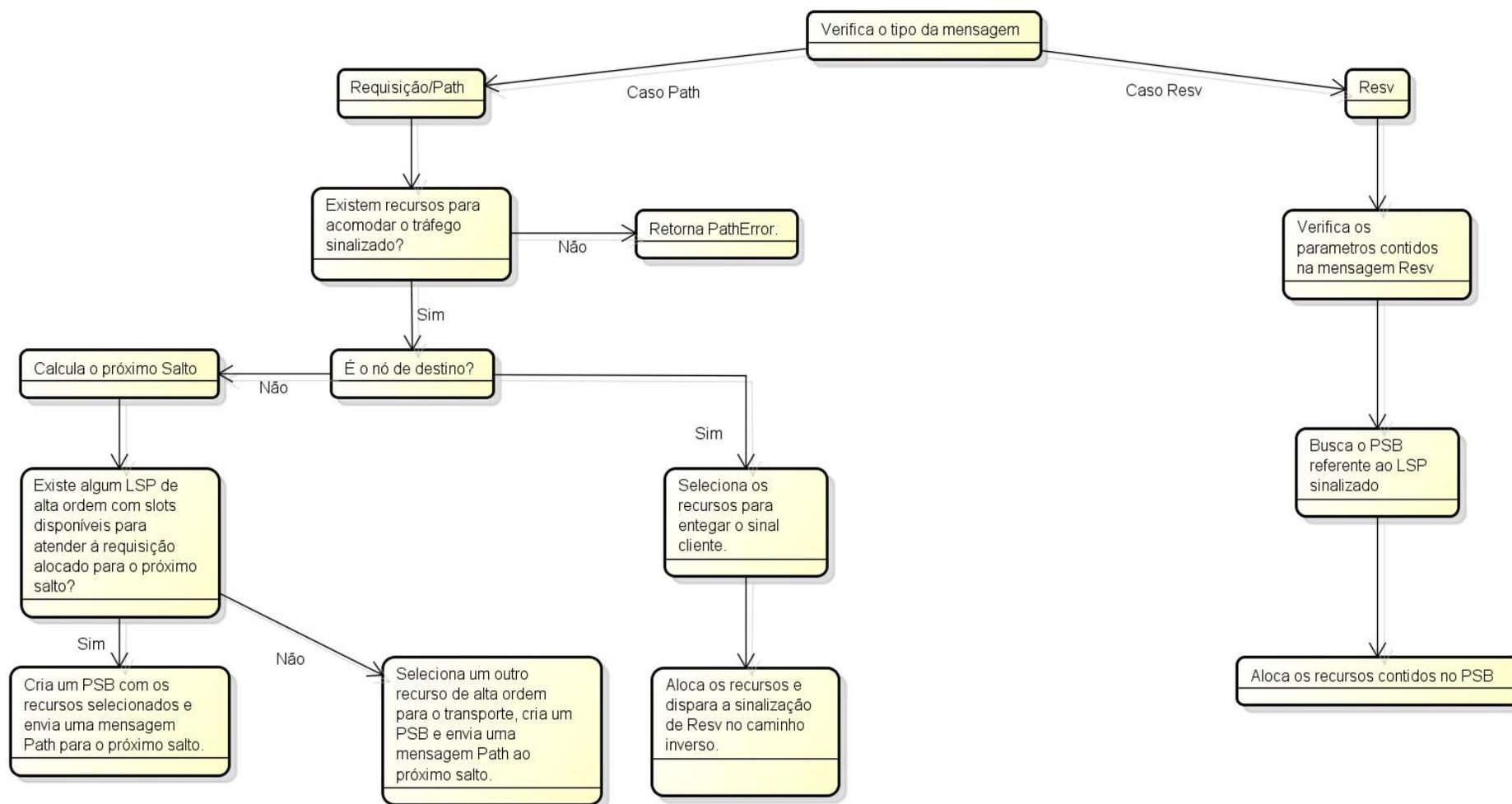


Figura I-0-1 - Diagrama de fluxo do processamento de uma mensagem de sinalização do plano de controle.

APÊNDICE II

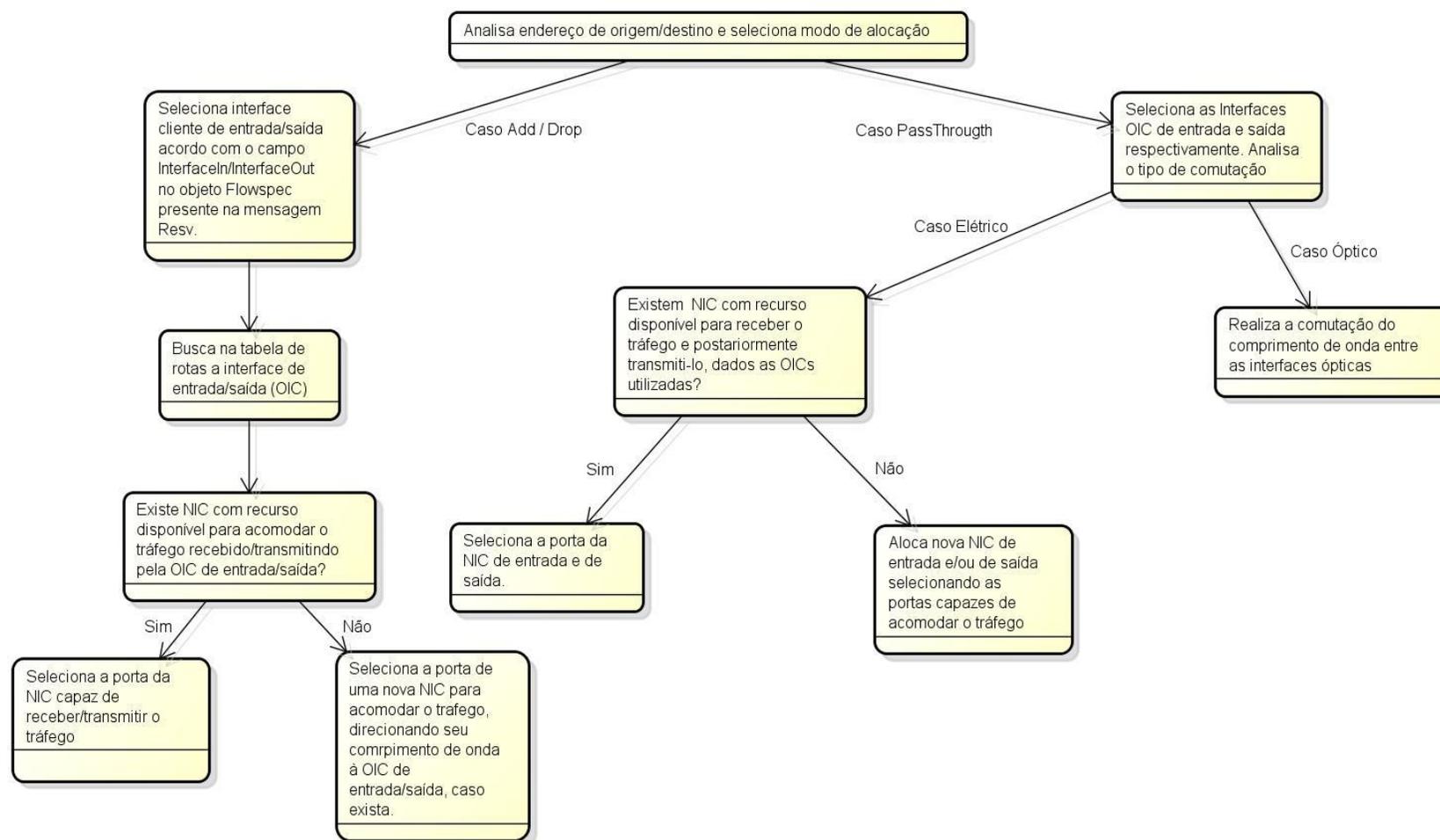


Figura II-0-1 - Diagrama de fluxo do processo de reserva de recurso realizado pelo plano de controle.

APÊNDICE III

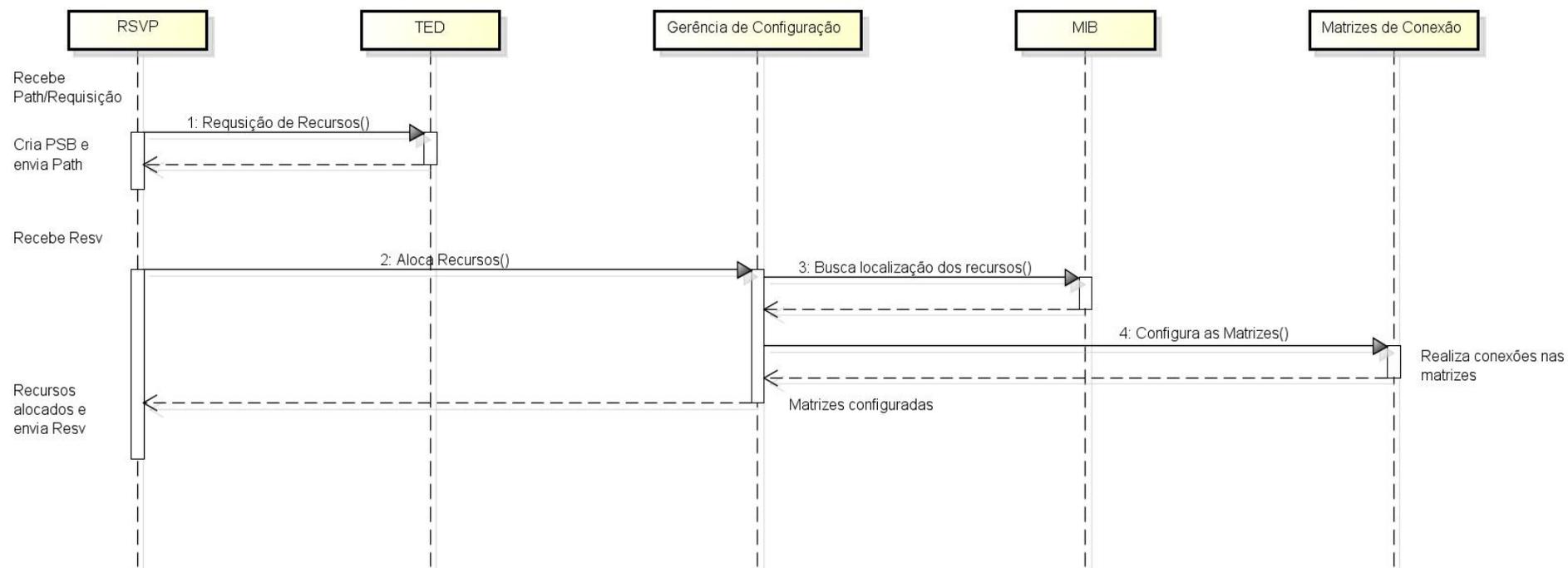


Figura III-0-1 - Diagrama de sequência do processo de configuração do equipamento.

APÊNDICE IV

A configuração de um cenário de teste envolve a configuração de alguns arquivos necessários para a configuração dos módulos desenvolvidos.

As interfaces de rede do controlador de cada *OTNSwitch* precisam ser configuradas via arquivo no seguinte formato:

```
ifconfig:
name: ppp0 inet_addr: 10.1.1.1    MTU: 1500  Metric: 1
name: ppp1 inet_addr: 10.1.1.2    MTU: 1500  Metric: 1
ifconfigend.

route:
10.1.2.1    10.1.2.1    255.255.255.255 H    0    ppp0
10.1.4.1    10.1.4.2    255.255.255.255 H    0    ppp1
routeend.
```

O arquivo registra cada interface do controlador e configura a rota *default* inicial. Deve existir um arquivo com as devidas configurações para cada controlador.

Outra configuração a ser realizada refere-se aos parâmetros dos LSPs da rede. Os parâmetros das LSPs a serem estabelecidas na rede devem ser informadas via arquivo XML no nó inicial da chamada. O arquivo segue o seguinte formato:

```
<?xml version="1.0"?>
<sessions>
  <session>
    <endpoint>10.1.2.1</endpoint>
    <tunnel_id>2</tunnel_id>
    <switchingType>7</switchingType> //Digital Wrapper
    <paths>
      <path>
        <lspid>1</lspid>
        <interface_in>1</interface_in>
        <interface_out>2</interface_out>
        <signalType>ODU2</signalType>
        <permanent>>true</permanent>
      </path>
      ...
      <path>
        ...
      </path>
    </paths>
  </session>
  ...
  <session>
    ...
  </session>
</sessions>
```

A *tag* <sessions> limita todas as seções RSVP iniciadas no nó. Cada nó pode ter mais de uma seção, onde interno a cada seção podem existir vários fluxos (LSPs) para o mesmo destino, podendo variar a taxa, interfaces. Cada LSP é identificada por um ID único interno à seção.

A configuração dos tipos de arquivos se faz necessária para o correto funcionamento do plano de controle.

APÊNDICE V

Log do cliente 3A gerado no cenário 1:

```

----- Client Informations -----
7.8146002364s / id: 19 / Client 10Gbps / cliente10G3A (600)

----- Trace Informations -----

Equipamento: otnSwitch5, enviado via: cic[3], taxa: 2
Equipamento: otnSwitch5, multiplexando: nic[0], taxa de entrada: 2
Equipamento: otnSwitch5, multiplexado: nic[0], taxa de saída: 4
Equipamento: otnSwitch5, enviado via: nic[0], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch5, enviado via: oic[0]
Equipamento: otnSwitch4, recebido via: oic[2]
Equipamento: otnSwitch4, recebido via: nic[2], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch4, demultiplexando: nic[2], taxa de entrada: 4
Equipamento: otnSwitch4, demultiplexando: nic[2], taxa de saída: 2
Equipamento: otnSwitch4, multiplexando: nic[0], taxa de entrada: 2
Equipamento: otnSwitch4, multiplexado: nic[0], taxa de saída: 4
Equipamento: otnSwitch4, enviado via: nic[0], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch4, enviado via: oic[0]
Equipamento: otnSwitch3, recebido via: oic[1]
Equipamento: otnSwitch3, recebido via: nic[0], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch3, demultiplexando: nic[0], taxa de entrada: 4
Equipamento: otnSwitch3, demultiplexando: nic[0], taxa de saída: 2
Equipamento: otnSwitch3, multiplexando: nic[1], taxa de entrada: 2
Equipamento: otnSwitch3, multiplexado: nic[1], taxa de saída: 4
Equipamento: otnSwitch3, enviado via: nic[1], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch3, enviado via: oic[0]
Equipamento: otnSwitch2, recebido via: oic[1]
Equipamento: otnSwitch2, recebido via: nic[0], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch2, demultiplexando: nic[0], taxa de entrada: 4
Equipamento: otnSwitch2, demultiplexando: nic[0], taxa de saída: 2
Equipamento: otnSwitch2, recebido via: cic[3], taxa: 2

```

Log do cliente 4A gerado no cenário 1:

```

----- Client Informations -----
7.8146002364s / id: 21 / Client 10Gbps / cliente10G4A (600)

----- Trace Informations -----

Equipamento: otnSwitch6, enviado via: cic[4], taxa: 2
Equipamento: otnSwitch6, multiplexando: nic[0], taxa de entrada: 2
Equipamento: otnSwitch6, multiplexado: nic[0], taxa de saída: 4
Equipamento: otnSwitch6, enviado via: nic[0], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch6, enviado via: oic[0]
Equipamento: otnSwitch5, recebido via: oic[1]
Equipamento: otnSwitch5, recebido via: nic[1], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch5, demultiplexando: nic[1], taxa de entrada: 4

```

```

Equipamento: otnSwitch5, demultiplexando: nic[1], taxa de saída: 2
Equipamento: otnSwitch5, multiplexando: nic[0], taxa de entrada: 2
Equipamento: otnSwitch5, multiplexado: nic[0], taxa de saída: 4
Equipamento: otnSwitch5, enviado via: nic[0], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch5, enviado via: oic[0]
Equipamento: otnSwitch4, recebido via: oic[2]
Equipamento: otnSwitch4, recebido via: nic[2], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch4, demultiplexando: nic[2], taxa de entrada: 4
Equipamento: otnSwitch4, demultiplexando: nic[2], taxa de saída: 2
Equipamento: otnSwitch4, multiplexando: nic[0], taxa de entrada: 2
Equipamento: otnSwitch4, multiplexado: nic[0], taxa de saída: 4
Equipamento: otnSwitch4, enviado via: nic[0], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch4, enviado via: oic[0]
Equipamento: otnSwitch3, recebido via: oic[1]
Equipamento: otnSwitch3, recebido via: nic[0], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch3, demultiplexando: nic[0], taxa de entrada: 4
Equipamento: otnSwitch3, demultiplexando: nic[0], taxa de saída: 2
Equipamento: otnSwitch3, recebido via: cic[4], taxa: 2

```

Log gerado pelo cliente 3A no cenário 2:

```
----- Client Informations -----
```

```
2.3210000354s / id: 16 / Client 40Gbps / cliente40G3A (600)
```

```
----- Trace Informations -----
```

```

Equipamento: otnSwitch1, enviado via: cic[0] , taxa: 3
Equipamento: otnSwitch1, multiplexando: nic[1], taxa de entrada: 3
Equipamento: otnSwitch1, multiplexado: nic[1], taxa de saída: 4
Equipamento: otnSwitch1, enviado via: nic[1] , taxa: 4
Equipamento: otnSwitch1, enviado via: oic[1]
Equipamento: otnSwitch5, recebido via: oic[0]
Equipamento: otnSwitch5, enviado via: oic[1]
Equipamento: otnSwitch6, recebido via: oic[0]
Equipamento: otnSwitch6, enviado via: oic[1]
Equipamento: otnSwitch4, recebido via: oic[1]
Equipamento: otnSwitch4, recebido via: nic[1] , taxa: 4
Equipamento: otnSwitch4, demultiplexando: nic[1], taxa de entrada: 4
Equipamento: otnSwitch4, demultiplexando: nic[1], taxa de saída: 3
Equipamento: otnSwitch4, recebido via: cic[0] , taxa: 3

```

Log gerado pelo cliente 4A no cenário 2:

```
----- Client Informations -----
```

```
29.8826006348s / id: 20 / Client 2.5Gbps / cliente2G54A (600)
```

```
----- Trace Informations -----
```

```

Equipamento: otnSwitch2, enviado via: cic[0], taxa: 1
Equipamento: otnSwitch2, multiplexando: nic[0], taxa de entrada: 1
Equipamento: otnSwitch2, multiplexado: nic[0], taxa de saída: 3

```

Equipamento: otnSwitch2, enviado via: nic[0], taxa: 3
Equipamento: otnSwitch2, multiplexando: nic[0], taxa de entrada: 3
Equipamento: otnSwitch2, multiplexado: nic[0], taxa de saída: 4
Equipamento: otnSwitch2, enviado via: nic[0], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch2, enviado via: oic[1]
Equipamento: otnSwitch3, recebido via: oic[0]
Equipamento: otnSwitch3, recebido via: nic[0], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch3, demultiplexando: nic[0], taxa de entrada: 4
Equipamento: otnSwitch3, demultiplexando: nic[0], taxa de saída: 3
Equipamento: otnSwitch3, recebido via: nic[0], taxa: 3
Equipamento: otnSwitch3, demultiplexando: nic[0], taxa de entrada: 3
Equipamento: otnSwitch3, demultiplexando: nic[0], taxa de saída: 1
Equipamento: otnSwitch3, multiplexando: nic[1], taxa de entrada: 1
Equipamento: otnSwitch3, multiplexado: nic[1], taxa de saída: 3
Equipamento: otnSwitch3, enviado via: nic[1], taxa: 3
Equipamento: otnSwitch3, multiplexando: nic[1], taxa de entrada: 3
Equipamento: otnSwitch3, multiplexado: nic[1], taxa de saída: 4
Equipamento: otnSwitch3, enviado via: nic[1], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch3, enviado via: oic[1]
Equipamento: otnSwitch4, recebido via: oic[0]
Equipamento: otnSwitch4, recebido via: nic[0], taxa: 4
Equipamento: otnSwitch4, demultiplexando: nic[0], taxa de entrada: 4
Equipamento: otnSwitch4, demultiplexando: nic[0], taxa de saída: 3
Equipamento: otnSwitch4, recebido via: nic[0], taxa: 3
Equipamento: otnSwitch4, demultiplexando: nic[0], taxa de entrada: 3
Equipamento: otnSwitch4, demultiplexando: nic[0], taxa de saída: 1
Equipamento: otnSwitch4, recebido via: cic[0], taxa: 1