

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Henrique Bastos Graciosa

**A Transformação das Redes Ópticas no Acesso e
no Anel Backbone Metropolitano: Alternativas
Tecnológicas, Econômicas e Novos Serviços**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Marbey Manhães Mosso

Rio de Janeiro
Janeiro de 2012



Henrique Bastos Graciosa

**A Transformação das Redes Ópticas no Acesso e
no Anel Backbone Metropolitano: Alternativas
Tecnológicas, Econômicas e Novos Serviços**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Marbey Manhães Mosso
Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Profa. Claudia Barucke Marcondes Paes Leme
Marcondes Barucke Comunicação Pedagógica

Profa. Maria Cristina Ribeiro Carvalho
Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Gláucio Lima Siqueira
Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Rodolfo Araujo de Azevedo Lima
Instituto de Pesquisas da Marinha

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 24 de janeiro de 2012

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Henrique Bastos Graciosa

Graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em telecomunicações pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) em 2001. Foi selecionado pela CAPES em 1999 para cursar parte de sua graduação no Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon na França no ano 2000. Desde 2002 é colaborador da empresa Padtec S.A, empresa brasileira líder no desenvolvimento e fornecimento de equipamentos e soluções para o transporte óptico. Tendo atuado nas áreas de desenvolvimento de produtos opto-eletrônicos para telecomunicações e projetos de redes ópticas, atualmente é responsável pela área de vendas técnicas no Rio de Janeiro.

Ficha Catalográfica

Graciosa, Henrique Bastos

A transformação das redes ópticas no acesso e no anel backbone metropolitano: alternativas tecnológicas, econômicas e novos serviços / Henrique Bastos Graciosa ; orientador: Marbey Manhães Mosso. – 2012.

160 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. ETHERNET. 3. Redes de acesso. 4. GPON. 5. XG-PON. 6. WDM-PON. 7. CAPEX. 8. OPEX. 9. Valor adicional. 10. ODN. 11. Redes metropolitanas. 12. DWDM. 13. ROADM. 14. OTN/G709. 15. TCO. I. Mosso, Marbey Manhães. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, por todo o suporte dispensado durante o curso e elaboração da dissertação.

Ao meu orientador Prof. Marbey Manhães Mosso, pela orientação, paciência, dedicação, estímulo e compreensão, sem os quais teria sido penosa a conciliação entre trabalho e estudo, sobretudo nas fases finais da elaboração da presente dissertação.

Aos professores com os quais tive aulas e aos colegas do CETUC/PUC.

Aos meus pais, Helio e Sandra, pela educação, valores e amor que deram as bases para eu atingir mais essa etapa de minha vida.

Aos meus irmãos, Guilherme e Marcelo, sempre presentes nos momentos importantes de minha vida.

Aos meus padrinhos Sergio e Gilda e avó Nely, pelo entendimento de meus momentos de reclusão e ausência nos encontros familiares na fase final do estudo.

A minha noiva Marcia Helena, cujo apoio, incentivo, serenidade e amor incondicionais me deram a tranquilidade de poder finalizar a presente dissertação.

Aos meus líderes na Padtec, Jorge Salomão e Argemiro, pela compreensão nos momentos de ausência e incentivo à conclusão do mestrado.

Resumo

Graciosa, Henrique Bastos; Mosso, Marbey Manhães (Orientador). **A Transformação das Redes Ópticas no Acesso e no Anel Backbone Metropolitano: Alternativas Tecnológicas, Econômicas e Novos Serviços**. Rio de Janeiro, 2012. 160p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A presente dissertação tem como objetivo avaliar as mudanças que estão ocorrendo nas arquiteturas das redes ópticas dos operadores de telecomunicações para adequarem-se aos novos serviços oferecidos aos usuários. Esses serviços demandam cada vez mais flexibilidade, confiabilidade e capacidade de todos os níveis das redes ópticas, desde o acesso até os *backbones* metropolitanos e de longa distância, passando pelas redes de agregação. No acesso, a principal transformação é a extensão da fibra óptica para pontos cada vez mais próximos do usuário, utilizando-se de tecnologia PON (*Passive Optical Network*), de maneira a oferecer maior banda permitindo a diversificação de serviços e aplicações, como vídeo de alta definição com interatividade. No *backbone* metropolitano também são verificadas importantes mudanças, implicando a necessidade de capacidades de transporte cada vez maiores (múltiplos lambdas de 40 Gbps ou 100 Gbps) com uso de DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) e OTN (*Optical Transport Network*), com roteamento de lambda no nível óptico por meio do uso de ROADM (*Reconfigurable Add-Drop Multiplexer*) e *switching* eletrônico também suportado pela OTN. Essa rede de elevada capacidade conecta-se diretamente às redes de acesso ou redes coletoras ou de agregação, aptas a transportar de forma eficiente tráfego baseado em pacotes. Nesse contexto, substituem-se as soluções tradicionais baseadas em TDM (*Time Division Multiplexing*) por soluções mais adaptadas ao transporte de pacotes e que garantam qualidade de serviço. Essa mesma rede de alta capacidade metropolitana também deve fazer interface com as redes de transmissão regionais e interurbanas de longa distância. O trabalho dará especial atenção às topologias de rede de acesso e *backbone* metropolitano descritas acima, comparando arquiteturas e investimentos associados.

Palavras-chave

ETHERNET, Redes de Acesso, GPON, XG-PON, WDM-PON, CAPEX, OPEX, Valor Adicional, ODN, Redes Metropolitanas, DWDM, ROADM, OTN/G709,TCO.

Abstract

Graciosa, Henrique Bastos; Mosso, Marbey Manhães (Advisor). **Optical Network Transformation on Access and Metropolitan Backbone Ring: Technological and Economical Alternatives and New Services**. Rio de Janeiro, 2012. 160p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation aims to evaluate the changes that are occurring in the telecom operators' optical network infrastructures to suit to the new services offered to their customers. These services demand increasingly flexibility, reliability and capacity from all optical network layers, from access to long-haul and metropolitan backbone, including aggregation layer. On access, the main transformation is the extension of the optical fiber to points closer to the customers using PON (Passive Optical Networks) technologies in order to offer higher bandwidths. With this strategy it is possible to enable applications and services diversification, like interactivity high definition video. It is also verified important changes on the metropolitan backbone. It is observed the need of improving the transport capacity (multiple 40 Gbps or 100 Gbps wavelengths) using DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) and OTN (Optical Transport Network), with wavelength routing using ROADM (Reconfigurable Add-Drop Multiplexer) and electronic switching. This high-capacity network is connected directly to the access or aggregation networks, which are able to efficiently carry packet-based traffic. In this context, traditional solutions based on TDM (Time Division Multiplexing) are replaced by solutions best adapted for packet transport with reliable quality of service. This same high-capacity metropolitan network should also be connected with the regional and long-haul networks. This work will give special attention to the access network topologies and metro backbone described above, comparing architectures and related investments.

Keywords

ETHERNET, Access Networks, GPON, XG-PON, WDM-PON, CAPEX, OPEX, Value Added, ODN, Metropolitan Networks, DWDM, ROADM, OTN/G709, TCO.

Sumário

1. Introdução.....	16
2. Perspectivas de Consumo de Banda no Acesso.....	20
2.1. Novos Serviços e Tecnologias de Acesso Banda Larga.....	20
2.2. IPTV.....	24
2.3. Arquitetura híbrida CDN-P2P.....	26
2.4. Comentários e Conclusões do Capítulo.....	28
3. Redes de Acesso.....	30
3.1. Tecnologias de Acesso Banda Larga para Suporte aos Novos Serviços.....	30
3.2. Arquitetura GPON.....	35
3.3. Evolução GPON.....	37
3.3.1. XG-PON.....	40
3.3.2. WDM-PON.....	41
3.3.3. Aumento do Alcance do GPON.....	41
3.4. Cenários Escalonáveis.....	43
3.4.1. Aumento de Proteção.....	45
3.4.2. Aumento de Banda – Cenário 1: XG-PON Assimétrico ou Simétrico.....	47
3.4.3. Aumento de Banda – Cenário 2: WDM-PON.....	49
3.4.4. Evolução GPON com Coexistência – Cenário 1: Overlaid-PON.....	51
3.4.5. Evolução GPON com Coexistência – Cenário 2: Overlaid-PON com WDM.....	53
3.5. Rede de Distribuição Óptica.....	56
3.6. Análise de Investimentos.....	58
3.7. Comentários e Conclusões do Capítulo.....	70
4. Redes Metropolitanas.....	73
4.1. Levantamento de Capacidade Requerida pela Rede Metropolitana.....	75
4.1.1. Banda larga FTTX utilizando rede GPON.....	75
4.1.2. Conexão para grandes clientes corporativos, SAN (<i>Storage Area Network</i>), conexão com outras operadoras e <i>carriers</i> e <i>backhauling</i> celular.....	80
4.2. Opções Tecnológicas.....	83
4.2.1. OTN.....	91
4.2.2. ROADM.....	119
4.3. Análise de Investimentos.....	125
4.3.1. Arquitetura proposta.....	125
4.3.2. Resultados e Análise.....	131
4.4. Comentários e Conclusões do Capítulo.....	138
5. Conclusões e Comentários finais.....	141
6. Referências bibliográficas.....	144

Lista de tabelas

Tabela 1 - Tráfego de <i>downstream</i> e <i>upstream</i> para distintas aplicações.	21
Tabela 2 - Fases de evolução do consumo de banda com vídeo.	22
Tabela 3 - Quantidade de usuários suportados por cada classe de ODN para três distâncias.....	34
Tabela 4 - Comparação entre tecnologias de amplificação para extensão de redes GPON.....	42
Tabela 5 - Comparação entre banda oferecida pelo GPON e pelo XG-GPON.....	49
Tabela 6 - Premissa para prospecção de banda requerida pela rede metropolitana para atendimento a serviços banda larga com FTTH.	75
Tabela 7 - Cenários considerados na análise.	76
Tabela 8 - Banda total requerida na rede metropolitana para cada cenário.....	76
Tabela 9 - Estrutura OTN para transporte de distintos tipos de sinais clientes de acordo a versão da recomendação G.709 de 2001.....	116
Tabela 10 - Estrutura OTN para transporte de distintos tipos de sinais clientes de acordo a recomendação G.709 de 2009.....	117
Tabela 11 - Composição da infraestrutura do nó com e sem ROADM.....	130
Tabela 12 - Cenários considerados nas análises de investimentos.....	131
Tabela 13 - Configuração de equipamentos OLT e ONT utilizada na seção 3.6.	150
Tabela 14 - Configuração de equipamentos correspondentes aos cenários 1, 2 e 3 utilizada na seção 4.3.....	151
Tabela 15 - Configuração de equipamentos correspondentes aos cenários 4, 5 e 6 utilizada na seção 4.3.	151
Tabela 16 - Configuração de equipamentos correspondentes aos cenários 7 e 8 utilizada na seção 4.3.....	152

Lista de figuras

Figura 1 - Visão geral dos tipos de redes e aplicações com destaque ao <i>backbone</i> metropolitano e ao acesso FTTH.	18
Figura 2 - Comparação entre a banda consumida para distintos serviços e a banda oferecida por distintas tecnologias de acesso banda larga.	23
Figura 3 - Arquitetura IPTV de alto nível.	26
Figura 4 - Etapas potenciais de evolução dos serviços IPTV.	26
Figura 5 - Arquitetura para VoD proposta em “ <i>A Hybrid CDN-P2P system for Video-on-Demand</i> ”	28
Figura 6 - Arquitetura de uma rede PON genérica.	32
Figura 7 - Arquitetura de uma rede GPON.	36
Figura 8 - Arquitetura de uma rede GPON com suporte a vídeo.	37
Figura 9 - Evolução da rede GPON em função do tempo.	39
Figura 10 - Plano de comprimento de onda de acordo com as recomendações ITU-T G.985.5 e G.987.1.	40
Figura 11 - Topologia exemplificando arquitetura para aumento do alcance da solução GPON.	42
Figura 12 - Exemplo de arquiteturas FTTX.	44
Figura 13 - Topologia do cenário básico GPON.	45
Figura 14 - Proteção do cabo localizado entre a OLT e o primeiro divisor óptico, utilizando-se um comutador óptico.	46
Figura 15 - Proteção da interface da OLT e do cabo localizado entre a OLT e o primeiro divisor óptico.	46
Figura 16 - Proteção da interface da OLT, do cabo localizado entre a OLT e o primeiro divisor óptico e dos cabos de acesso a ONT.	47
Figura 17 - Topologia XG-PON substituindo topologia básica GPON.	48
Figura 18 - Topologia WDM-PON.	50
Figura 19 - Topologia XG-PON coexistindo com topologia básica GPON.	52
Figura 20 - Topologia WDM-PON coexistindo com topologia XG-PON e GPON.	54
Figura 21 - Detalhamento do Filtro e Multiplexador/Demultiplexador utilizados junto à OLT.	54
Figura 22 - Detalhamento do Filtro, divisor óptico e Multiplexador/Demultiplexador utilizados ao longo da rede de distribuição óptica.	55
Figura 23 - Arquitetura ODN com dois níveis de distribuição.	56
Figura 24 - Arquitetura ODN com um nível de distribuição.	56

Figura 25 - Configuração OLT mostrando conexões com rede de acesso e backbone.....	59
Figura 26 - Valor adicional de elementos passivos para preparação da rede para suporte à ampliação em relação ao valor total de Capex de equipamentos considerando uma única rede com 32 usuários.	61
Figura 27 - Valor adicional de elementos passivos para preparação da rede para suporte à ampliação em relação ao valor total de Capex de equipamentos considerando 64 redes com 32 usuários cada.....	62
Figura 28 - Valor adicional de elementos passivos para preparação da rede para suporte à ampliação em relação ao valor total de Capex de equipamentos e ODN considerando uma única rede com 32 usuários.....	64
Figura 29 - Valor adicional de elementos passivos para preparação da rede para suporte à ampliação em relação ao valor total do Capex de equipamentos e ODN considerando 64 redes com 32 usuários cada.	65
Figura 30 - Capex adicional em relação ao Capex total para preparação da rede para suporte aos cenários 1 e 2 em função da variação do comprimento médio de cada rede GPON para distintos 3 valores de referência do km de ODN instalada para 1 rede com 32 usuários.	67
Figura 31 - Capex adicional em relação ao Capex total para preparação da rede para suporte aos cenários 1 e 2 em função da variação do comprimento médio de cada rede GPON para distintos 3 valores de referência do km de ODN instalada para 64 redes com 32 usuários cada.	68
Figura 32 - Estrutura posicionada junto a OLT pronta para receber o cenário 2. .	69
Figura 33 - Estrutura posicionada na ODN pronta para receber o cenário 2.....	69
Figura 34 - Visão geral das redes metropolitanas ilustrando suas conexões e diversidades de atendimentos.	73
Figura 35 - Diversidade de protocolos e velocidades na agregação e capacidades de transporte exigidas das redes metropolitanas.	82
Figura 36 - Sistema de transmissão WDM genérico.....	86
Figura 37 - Alocação de canais CWDM e DWDM.....	87
Figura 38 - Diagrama de um sistema de transmissão DWDM genérico mostrando seus elementos principais e a conexão entre eles.	91
Figura 39 - Evolução nos padrões e tecnologias para as redes de transporte.....	92
Figura 40 - Representação da estrutura de camadas.....	94
Figura 41 - Representação da estrutura de camadas simplificada.....	95
Figura 42 - Estrutura do quadro do canal óptico (OCh).....	95
Figura 43 - Estrutura do quadro OTN detalhada.....	96
Figura 44 - Formação FEC.....	98
Figura 45 - Algumas opções de mapeamento e multiplexação.	100
Figura 46 - BER corrigida em relação à potência de recepção para situação com e sem FEC.....	101

Figura 47 - Relação teórica entre BER de entrada e BER de saída com FEC utilizando RS (255, 239) de acordo com a ITU-T G.975.....	102
Figura 48 - Exemplo de solução com e sem uso de multiplexação OTN.....	104
Figura 49 - Estrutura de mapeamento com uso de SDH.	106
Figura 50 - Estrutura de mapeamento sem uso de SDH.....	107
Figura 51 - Comparação de facilidades de gerenciamento em sistema com e sem gerenciamento OTN.....	109
Figura 52 - Comparação entre etapas para identificação de falha ou degradação com e sem gerência OAM OTN.....	109
Figura 53 - Conexão Gigabit Ethernet ou 10 Gigabit Ethernet entre nós C e E com transporte feito diretamente sobre OTN.....	111
Figura 54 - Sistema WDM com conexão (lambda) dedicada para cada atendimento.	112
Figura 55 - Exemplo de matriz de tráfego.....	113
Figura 56 - Sistema WDM OTN para transporte de sub-lambda.....	113
Figura 57 - Gerenciamento de sinal cliente em ambiente multi-domínio utilizando OTN.....	114
Figura 58 - Redes ópticas com ROADMs de distintos graus.....	120
Figura 59 - Detalhamento de nó com ROADM grau 4.	120
Figura 60 - Detalhamento de nó ROADM grau 3 <i>directionless</i>	123
Figura 61 - Conceito da arquitetura de rede óptica metropolitana DWDM OTN utilizada na análise de investimentos.	126
Figura 62 - Legenda utilizada nas figuras 63 e 64.....	127
Figura 63 - Arquitetura nó DWDM.....	127
Figura 64 - Arquitetura nó DWDM com ROADM.....	128
Figura 65 - Capex para ativação da infraestrutura de cada cenário em relação ao Capex do cenário 1.	133
Figura 66 - TCO em 5 anos para ativação completa de cada cenário em relação ao TCO do cenário 1.....	134
Figura 67 - Capacidade, TCO em 5 anos e custo do Mbps de cada cenário em relação aos mesmos parâmetros do cenário 1.....	136
Figura 68 - TCO em 5 anos e custo do Mbps dos cenários 5, 6, 7 e 8 em relação aos mesmos parâmetros do cenário 1 com análise de sensibilidade.	137

Lista de Acrônimos

ADM – Add and Drop Multiplexer
ADM – Add and Drop Multiplexer
ADSL – Asymmetric Digital Subscriber Line
ADSL2 – Asymmetric Digital Subscriber Line 2
ADSL2+ – Asymmetric Digital Subscriber Line 2 Plus
AMP – Asynchronous Mapping Procedure
ANSI – American National Standards Institute
ATM – Asynchronous Transfer Mode
AWG – Arrayed Waveguide Grating
BER – Bit Error Rate
BMP – Bit-Synchronous Mapping Procedure
B-RAS – Broadband Remote Access Servers
BSS – Business Support Systems
Capex – Capital Expenditure
CATV – Cable TV
CDC – Colorless, Directionless, Contentioless
CDN – Content Distribution/Delivery Network
CDN-P2P – Content Distribution Network Peer-to-Peer
CWDM – Coarse Wavelength Division Multiplexing
DBA – Dynamic Bandwidth Assignment
DCF – Dispersion Compensating Fiber
DFB – Distributed Feedback
DGO – Distribuidor Geral Óptico
DMB – Digital Multimedia Broadcast
DOCSIS – Data Over Cable Service Interface Specification
DSL – Digital Subscriber Line
DSLAMs – Digital Subscriber Line Access Multiplexers
DVB-H – Direct Video Broadcast - Handset
DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA – Erbium-Doped Fiber Amplifier

EOAM – Ethernet Operation, Administration and Maintenance
EPON – Ethernet Passive Optical Network
ESCON – Enterprise Systems Connection
FAT – Fiber Access Terminal
FC – Fiber Channel
FDM – Frequency Division Multiplexing
FDT – Fiber Distribution Terminal
FEC – Forward Error Correction
FICON – Fiber Connection
FSAN – Full Service Access Network
FTTH – Fiber-to-the-Home
GbE – Gigabit Ethernet
Gbps – Gigabits per second
GFC – Gigabit Fiber Channel
GFP-F – Frame-Mapped Generic Framing Procedure
GPON – Gigabit Capable Passive Optical Network
HD – High-Definition
HD-SDI – High-Definition Serial Digital Interface
HDTV – High-Definition Television
HFC – Hybrid Fiber-Coaxial
IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP – Internet Protocol
IPTV – Internet Protocol Television
ITU-T – International Telecommunication Union - Telecommunication
Standardization Sector
km – quilômetro
LAN – Local Area Network
MAN – Metropolitan Area Network
Mbps – Megabits per seconds
MPLS – Multiprotocol Label Switching
MPLS-TP – Multiprotocol Label Switching - Transport Profile
NG-PON – Next Generation - Passive Optical Network
nm – nanômetro
OADM – Optical Add-Drop Multiplexer

OAM – Operation, Administration and Maintenance
OCh/OChr – Optical Channel
ODN – Optical Distribution Network
ODU – Optical Data Unit
OLT – Optical Line Terminator
OMS – Optical Multiplex Section
ONT – Optical Network Terminal
ONU – Optical Network Unit
Opex – Operational Expenditure
OPS – Optical Physical Section
OPU – Optical Payload Unit
OSI – Open Systems Interconnection
OSS – Operational Support Systems
OTN – Optical Transport Network
OTS – Optical Transmission Section
OTU – Optical Channel Transport Unit
P2P – Peer-to-Peer system
PLC – Planar Lightwave Circuit
PMD – Polarization Mode Dispersion
PON – Passive Optical Network
P-OTS – Packet-Optical Transport System
QoE – Quality of Experience
QoS – Quality of Service
RF – Radio Frequency
ROADM – Reconfigurable Add-Drop Multiplexer
RPT – Remote Protocol Termination
SAN – Storage Area Network
SD – Standard-Definition
SDH – Synchronous Digital Hierarchy
SDI – Serial Digital Interface
SD-SDI – Standard-Definition Serial Digital Interface
SDTV – Standard-Definition Television
SMF – Single-Mode Optical Fiber
SMPTE – Society of Motion Picture and Television Engineers

SNIA – Storage Network Industry Association
STM – Synchronous Transport Module
Tbps – Terabits per second
TCM – Tandem Connection Monitoring
TCO – Total Cost of Ownership
TDM – Time Division Multiplexing
TS – Timeslot
UHDTV – Ultra High-Definition Television
VDSL – Very High Speed Digital Subscriber Line
VDSL2 – Very High Speed Digital Subscriber Line 2
VoD – Video on Demand
VoIP – Voice over Internet Protocol
WB – Wavelength Blocking
WDM – Wavelength Division Multiplexing
WDM-PON – Wavelength Division Multiplexer - Passive Optical Network
WFB – Wavelength Blocking Filter
WiMAX – Worldwide Interoperability for Microwave Access
WSS – Wavelength Selective Switch
XG-PON – Ten Gigabit - Passive Optical Network