Universidade de São Paulo – USP
Escola de Engenharia de São Carlos – EESC
Departamento de Engenharia Elétrica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Transporte TDM em Redes GPON

Autor: Marcelo Alves Guimarães

Orientadora: Profa. Dra. Mônica de Lacerda Rocha

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica.

São Carlos
2011

Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

G963t Guimarães, Marcelo Alves
 Transporte TDM em redes GPON / Marcelo Alves
 Guimarães; orientadora Mônica de Lacerda Rocha. -- São
 Carlos, 2011.

 Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e Área de Concentração em
Telecomunicações) -- Escola de Engenharia de São Carlos
da Universidade de São Paulo, 2011.

 1. Comunicação óptica. 2. Telefonia. 3. Eletrônica
digital. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Engenheiro **MARCELO ALVES GUIMARÃES**.

Dissertação defendida e julgada em 17/02/2011 perante a Comissão Julgadora:

Mônica de Lacerda Rocha

Prof^a. Dr^a. **MÔNICA DE LACERDA ROCHA** – (Orientadora)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Muriel

Prof. Titular **MURILO ARAUJO ROMERO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Alberto Paradisi

Dr. **ALBERTO PARADISI**
(Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Telebrás/CPqD)

Aprovado

Denis Vinicius Coury

Prof. Titular **DENIS VINICIUS COURY**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica

Paulo Cesar Lima Segantine

Prof. Associado **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois nos momentos de dificuldade a certeza de sua presença me trouxe esperança.

Aos meus pais, Mário Dias Guimarães (*in memoriam*) e Francisca Alves Guimarães, o mais profundo agradecimento pelo incentivo e ensinamentos fundamentais para seguir adiante nos estudos e na vida.

À minha tia, Estelita Santana Alves (*in memoriam*), agradeço o incentivo, a presença e a sua própria existência. Devo a você tudo que sou.

Aos Meus Irmãos Francisco, James, Tatiana e Zenaide, pela compreensão, paciência e ajuda nos momentos difíceis.

À minha avó, Emiliana Teixeira de Santana (*in memoriam*), pelos valores religiosos e familiares ensinados ao longo de minha vida.

Aos meus tios (as), pelo carinho que sempre tiveram por mim.

Aos familiares que incentivaram e torceram durante esta jornada.

À minha namorada Natália Marques Bastos, pelo apoio, amizade, incentivo e compreensão.

À professora, Mônica de Lacerda Rocha, pela oportunidade, orientação, confiança, dedicação e pelos exemplos de profissionalismo repassados ao longo da convivência.

Aos professores do grupo de Telecomunicações, pelos conhecimentos transmitidos.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP, pela presteza e eficiência. Aos demais pertencentes à instituição.

Aos colegas e amigo(a)s do departamento, Aldir, Alex (Dengo), Anderson (Maria), Anderson Betiol, Artur, Breno Caetano, Carmen, Clenilson (Indiã), Daniel, Daniel Barbosa, Danilo, Eduardo (Pumba), Eduardo (Edu), Emiliano, Fernando (Kostela), Getúlio, Gustavo Fraidenraich, Guilherme, Helvécio (Bambi), Hermes, Lorena, Luizir (Português), Mariana, Pedro, Rafael (Big), Tany (Peruano), Ulisses, Valdemir e Yang (Chinês), pela oportunidade da convivência diária, conhecimentos trocados, conversas no “momento do café” e demais situações de descontração que contribuíram para trazer alegria ao longo da estada em São Carlos.

Aos colegas e amigos (a)s do curso de formação de Projetista de Circuitos Integrados (CI-Brasil), Alberto (Mexicano), Ana, André (Mano), Bruno, Carlos, Caroline, Charles, Diego, Elói, Erlon, Gabriela, Gustavo, Inácio, João (Baiano), João (Mineiro), Jonatas, Jones,

Marcello, Nelson, Pablo, Paulo Daving, Paulo Henrique, Pedro Fausto, Teymisso (Teimoso), Ulysses, Valéria e Yesid, pelo convívio, companheirismo e pela colaboração direta neste trabalho, pelos conhecimentos transmitidos.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro, e ao projeto em conjunto com a Fundação CPqD, pela oportunidade de estágio e, em especial, à Miriam Regina Xavier de Barros, ao Sandro Marcelo Rossi, ao Marcos Perez Mokarzel e ao Alberto Paradisi.

RESUMO

GUIMARÃES, M. A. (2011). Transporte TDM em Redes GPON. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

Neste trabalho analisamos e propomos a utilização de TDM (*Time Division Multiplexing*) nativo canalizado/estruturado em redes PON (*Passive Optical Network*) com padrão GPON (*Gigabit Passive Optical Network*), com ênfase na estrutura de transmissão do legado das redes de telefonia. O objetivo principal é obter um aumento na eficiência de banda transmitida através da fragmentação de sinais E1 sem que seja necessário o uso de técnicas de emulação de circuito (que reduzem a eficiência de banda devido à adição de cabeçalhos).

Inicialmente, é descrito o transporte TDM em redes GPON, como efetuado pelos equipamentos comerciais atuais através de duas técnicas: CES - *Circuit Emulation Service* - e TDM nativo não estruturado. Em seguida, é introduzido o conceito de comutação digital visando sua aplicação no transporte TDM nativo estruturado em redes GPON. Nesta etapa, é proposta uma solução para este transporte, é descrito o protocolo utilizado bem como seu funcionamento. Por fim, como prova de conceito, é apresentada uma implementação em HDL (*Hardware Description Language*) para FPGA (*Field Programmable Gate Array*).

Palavras-chave: Comunicação Óptica, *Passive Optical Networks* (PON), Gigabit PON (GPON), Transporte TDM, TDM nativo, Fragmentação de E1, Comutação Digital, *Circuit Emulation Service* (CES), *Hardware Description Language* (HDL), *Field-Programmable Gate Array* (FPGA).

ABSTRACT

GUIMARÃES, M. A. (2011). TDM transport in GPON Networks. M. Sc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

In this work we analyze and propose the use of native channelled /structured TDM (Time Division Multiplexing) in GPON (Gigabit Passive Optical Network), with emphasis on the structure for transmission of the telephone network legacy. The main target is to achieve an increase in transmitted bandwidth efficiency by fragmenting E1 signals, thus avoiding the use of circuit emulation techniques (which reduce the bandwidth efficiency due to overhead addition).

Initially, it is described in TDM transport in GPON networks, as it is performed in present commercial equipment by two techniques: CES - *Circuit Emulation Service* and Native TDM - unstructured. Next, we introduce the concepts of digital switching aiming its application on the transport of native and structured TDM in GPON. At this stage, we propose a transport solution, describe its protocol and functionalities. Finally, for concept proof, we present an implementation in HDL (*Hardware Description Language*) meant to FPGA (*Field Programmable Gate Array*) application.

Keywords: Optical Communication, Passive Optical Networks (PON), Gigabit PON (GPON), TDM Transport, Native TDM, E1 fragmentation, Digital Switching, *Circuit Emulation Service* (CES), Hardware Description Language (HDL), Field-Programmable Gate Array (FPGA).

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - REDES ÓPTICAS DE ACESSO	5
2.1. Topologias das redes PON	5
2.1.1. Topologia em árvore	5
2.2.2. Topologia em anel	6
2.3.3. Topologia em Barramento	6
2.2. Componentes de uma rede PON	7
2.2.1. Terminal de Linha Óptico (OLT)	7
2.2.2. Unidade de Rede Óptica (ONU)	7
2.2.3. Terminal de Rede Óptica (ONT)	8
2.2.4. <i>Splitter</i>	8
2.2.5. Distribuidor de rede óptica (ODN)	9
2.3. Técnicas de Acesso Múltiplo em Redes PON	9
2.4. Redes ópticas passivas - PON	10
2.5. APON/BPON	11
2.6. EPON	13
2.7. GPON	14
2.7.1. Estrutura GPON	15
2.7.2. Quadro GTC (G-PON <i>Transmission Convergence</i>)	16
2.7.3. Estrutura do quadro <i>downstream</i> em GPON	16
2.7.4. Estrutura do quadro <i>upstream</i> em GPON	17
2.7.5. Transmissão GPON	18
2.7.6. Segmento GEM	19
2.7.7. Mapeamento de Quadros GEM no <i>Payload</i> do GTC	19
CAPÍTULO 3 - TRÁFEGO TDM EM REDES GPON	21
3. REDE GPON	21
3.1. Tráfego Externo	22
3.1.1. STM-1	22
3.2. Tráfego Interno	24
3.2.1. CES	24
3.2.2.1. CES Estruturado	24
3.2.2.2. CES Não estruturado	25
3.2.2.3. CESoGPON	25
3.2.2. TDM Nativo	26
3.2.2.1 TDM sobre GEM	27
3.3. E1 Não estruturado e E1 Estruturado	29
3.3.1. E1 Não estruturado	29
3.3.2. E1 Estruturado	29

3.3.2.1. Formação	30
3.3.2.2. Multiquadro	31
CAPÍTULO 4 - TDM NATIVO (ESTRUTURADO/CANALIZADO) EM REDES	
GPON	33
4.1. Comutação Digital.....	33
4.1.1. Comutação Temporal.....	34
4.1.2. Comutação Espacial.....	35
4.1.3. Comutação Temporal – Espacial – Temporal (TST).....	36
4.1.4. Comutação Espacial – Temporal – Temporal (STS).....	39
4.2. FPGA.....	41
4.2.1. Demux SDH, Interface GEM e FE1oGEM (<i>Fractional E1oGEM</i>) .	41
4.2.1.1. Demux SDH.....	41
4.2.1.1.1. <i>Downstream</i>	41
4.2.1.1.2. Comutação dos 63 canais E1	42
4.2.1.1.3. <i>Upstream</i>	44
4.2.1.2. Interface GEM e IPcore FE1oGEM.....	44
4.2.1.2.1. Interface GEM de <i>Downstream</i> do Chip GPON-OLT	45
4.2.1.2.2. Interface GEM de <i>Upstream</i> do Chip GPON-OLT	45
4.2.1.2.3. Interface GEM de <i>Downstream</i> do Chip GPON-ONU ...	46
4.2.1.2.4. Interface GEM de <i>Upstream</i> do Chip GPON-ONU.....	46
4.2.1.3. IPcore FE1oGEM.....	47
4.2.1.3.1. IPcore FE1oGEM – <i>Downstream</i> OLT.....	49
4.2.1.3.2. IPcore FE1oGEM – <i>Upstream</i> OLT	50
4.2.1.3.3. IPcore FE1oGEM – <i>Downstream</i> ONU	50
4.2.1.3.4. IPcore FE1oGEM – <i>Upstream</i> ONU.....	52
4.3. Clock GPON.....	53
CAPÍTULO 5 - PROPOSTA DE PROJETO, IMPLEMENTAÇÃO, SIMULAÇÃO E	
RESULTADOS OBTIDOS	55
5. PROJETO GPON.....	55
5.1. Visão geral.....	55
5.1.1. Nova proposta GPON – <i>Downstream</i>	56
5.1.2. Nova proposta GPON – <i>Upstream</i>	58
5.2. Implementação	59
5.2.1. <i>Downstream</i>	59
5.2.1.1. OLT	59
5.2.1.2. ONU	61
5.2.2. <i>Upstream</i>	63
5.2.2.1. ONU	63
5.2.2.2. OLT	65
5.3. Simulação	67
5.3.1. <i>Downstream</i>	67
5.3.1.1. OLT	69
5.3.1.2. ONU	70
5.3.2. <i>Upstream</i>	71

5.3.2.1. ONU	73
5.3.2.2. OLT	74
5.4. Resultados da Simulação	75
5.4.1. <i>Downstream</i>	75
5.4.1.1. OLT	77
5.4.1.2. ONU	83
5.4.2. <i>Upstream</i>	87
5.4.2.1. ONU	89
5.4.2.2. OLT	94
CAPÍTULO 6	99
CONCLUSÕES	99
REFERÊNCIAS	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Topologia em árvore.	6
Figura 2: Topologia em Anel.....	6
Figura 3: Topologia em Barramento.	7
Figura 4: <i>Splitter</i> Óptico [23].	8
Figura 5: Rede PON.	9
Figura 6: Rede PON	11
Figura 7: Formato do quadro BPON (<i>Downstream</i> e <i>Upstream</i>) na taxa de 155,520 Mb/s. Para taxas de 622,080 Mb/s e 1244,160 Mb/s, o número de <i>time slots</i> é multiplicado por 4 ou 8 para o número mostrado na figura [15].	12
Figura 8: Transmissão de dados EPON: a) <i>Downstream</i> ; b) <i>Upstream</i> [16]	14
Figura 9: Quadro de downstream GTC TC [24].....	17
Figura 10: GTC TC Physical Control Block <i>downstream</i> [24].	17
Figura 11: Estrutura de alocação do mapa de largura de banda GTC [24].	17
Figura 12: Estrutura do quadro <i>upstream</i> em GPON [24].....	18
Figura 13: Detalhe do cabeçalho de <i>upstream</i> [24].	18
Figura 14: Estrutura de um equipamento GPON	21
Figura 15: Exemplo de estrutura de formação do STM-1	22
Figura 16: Estrutura do quadro STM-1 (2) [31].	23
Figura 17: <i>Circuit emulation service</i> através de uma rede comutada por pacote [34].	24
Figura 18: Formato do pacote CESoPSN estruturado [34], [35].....	25
Figura 19: Formato do pacote CESoPSN não estruturado [34], [35].	25
Figura 20: CESoGPON [38].	26
Figura 21: Estrutura do quadro de dados TDM no quadro GEM [24].	27
Figura 22: Mapeamento TDM sobre GEM [24].	28
Figura 23: Padrão ITU-T para GPON	28
Figura 24: E1 Não estruturado	29
Figura 25: E1 Estruturado	30
Figura 26: Quadro E1	31
Figura 27: Estrutura de formação Multiquadro E1	31
Figura 28: Multiquadro E1	32
Figura 29: Comutador Temporal de Escrita Cíclica.....	34
Figura 30: Comutador Espacial	35
Figura 31: Comutador TST com bloqueio.....	37
Figura 32: Comutador TST sem bloqueio	38
Figura 33: Comutador STS com bloqueio	40
Figura 34: Comutador STS sem bloqueio	41
Figura 35: FPGA – <i>Downstream</i> (Parte1)	42
Figura 36: Comutação Temporal e Espacial dos 63 canais E1.....	43
Figura 37: FPGA – <i>Upstream</i>	44

Figura 38: Visão geral das interfaces do Chip GPON-OLT e Chip GPON-ONU.....	45
Figura 39: Sinal de saída GEM do Chip GPON-ONU	46
Figura 40: Fragmento GEM e Quatro FE1oGEM.....	47
Figura 41: FPGA – <i>Downstream</i> (Parte2).....	48
Figura 42: Sinal de entrada GEM do Chip GPON-OLT.....	49
Figura 43: Sinal de saída GEM do Chip GPON-ONU	51
Figura 44: Mapeamento dos <i>time slots</i> em suas respectivas LIUs.....	52
Figura 45: Desmapeamento dos <i>time slots</i> em suas respectivas LIUs.....	53
Figura 46: Fonte de Clock GPON.....	53
Figura 47: Tráfego SDH em redes GPON	56
Figura 48: Nova proposta de tráfego <i>downstream</i> em redes GPON.....	57
Figura 49: Nova proposta de tráfego <i>upstream</i> em redes GPON	58
Figura 50: Proposta para implementação.....	59
Figura 51: OLT - Bloco 1 (<i>Downstream</i>).	60
Figura 52: Comutação Temporal e Espacial, seguida da inserção de cabeçalho de OLT (<i>Downstream</i>).....	61
Figura 53: ONU - Bloco 2 (<i>Downstream</i>).	62
Figura 54: Remoção de cabeçalho, comutação temporal e espacial da ONU (<i>Downstream</i>).	63
Figura 55: ONU - Bloco 2 (<i>upstream</i>).	64
Figura 56: Comutação Temporal e Espacial, seguida da inserção de cabeçalho da ONU (<i>upstream</i>).	65
Figura 57: ONU - Bloco 1 (<i>upstream</i>).	66
Figura 58: Remoção de cabeçalho, Comutação Temporal e Espacial da OLT (<i>upstream</i>).	67
Figura 59: Fluxograma (<i>downstream</i>).....	68
Figura 60: Simulação OLT (<i>downstream</i>)	70
Figura 61: Simulação OLT (<i>downstream</i>)	71
Figura 62: Fluxograma (<i>upstream</i>)	72
Figura 63: Simulação ONU (<i>upstream</i>)	74
Figura 64: Simulação OLT (<i>upstream</i>).....	75
Figura 65: <i>Downstream</i>	76
Figura 66: <i>Downstream</i> OLT (Entrada).....	79
Figura 67: <i>Downstream</i> OLT (Saída).	80
Figura 68: <i>Downstream</i> ONU (Saída).	84
Figura 69: <i>Upstream</i>	88
Figura 70: <i>Upstream</i> ONU (Entrada).....	90
Figura 71: <i>Upstream</i> ONU (Saída).	91
Figura 72: <i>Upstream</i> OLT (Saída).....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Demanda de largura de banda de vários serviços [5]	2
Tabela 2: Taxas de Bits de <i>Downstream</i> / <i>Upstream</i> em redes BPON [15].....	12
Tabela 3: Características das recomendações ITU-T G.984.x [22]-[26].....	14
Tabela 4: Taxas de transmissão da rede GPON.	16
Tabela 5: Descrição do Fragmento GEM e Quadro FE1oGEM.....	47
Tabela 6: Descrição dos arquivos de <i>downstream</i>	77
Tabela 7: Descrição dos sinais	78
Tabela 8: Entrada dados na OLT (<i>downstream</i>).....	81
Tabela 9: Saída dados na OLT (<i>downstream</i>)	82
Tabela 10: Entrada de dados na ONU (<i>downstream</i>).....	85
Tabela 11: Saída de dados na ONU (<i>downstream</i>)	86
Tabela 12: Descrição dos arquivos de <i>upstream</i>	87
Tabela 13: Entrada de dados na ONU (<i>upstream</i>).....	92
Tabela 14: Saída de dados na ONU (<i>upstream</i>)	93
Tabela 15: Entrada de dados na OLT (<i>upstream</i>)	96
Tabela 16: Saída de dados na OLT (<i>upstream</i>).....	97

LISTA DE ACRÔNIMOS

ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AES	Advanced Encryption Standard
ANSI	American National Standards Institute
APON	Asynchronous Transfer Mod PON
ATM	Asynchronous Transfer Mod
AU	Administrative Unit
BPON	Broadband PON
BWmap	Bandwidth Map
C-x	Container - x
CAS	Channel Associated Signaling
CBR	Constant Bit Rate
CES	Circuit Emulation Service
CESoGPON	Circuit Emulation Service over GPON
CO	Central Office
CSN	Circuit-Switched networks
DBRu	Dynamic Bandwidth Report upstream
DS0	Canal de 64 kb/s
DSL	Digital Subscriber Line
E1	European format for digital transmission
EPON	Ethernet PON
FE1	Fractional E1
FE1oGEM	Fractional E1 over GEM
FPGA	Field Programmable Gate Array
FSAN	Full Services Access Network

FSE	Extended Superframe
FTTB	Fiber to the Business
FTTC	Fiber to the Curb
FTTH	Fiber to the Home
FTTN	Fiber to the Neighborhood
FTTP	Fiber to the Premises
GEM	GPON Encapsulation Method
GEPON	Gigabit Ethernet Passive Optical Network
GPON	Gigabit PON
GTC	G-PON Transmission Convergence
HDL	Hardware Description Language
HDTV	High Definition Television
HEC	Header Error Check
HFC	Hybrid fiber-coax cable modem
IP	Internet Protocol
IPTV	Internet Protocol Television
ITU-T	Telecommunication Standardization Sector
LIU	Line Interface Unit
LLID	Logical Link Identifier
MAC	Media Access Control
OAM	Operation, Administration and Maintenance
OCDMA	Optical Code Division Multiple Access
ODN	Optical Distribution Network
OLT	Optical Line Terminal
OMCI	ONU Management and Control Interface
ONU	Optical Network Unit
ONT	Optical Network Terminal

PBX	Private Branch Exchang
PCBd	Physical Control Block downstream
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
PLI	Payload Length Indicator
PLOAM	Physical Layer Operations, Administration and Management
PLOAMu	Physical Layer Operations, Administration and Management upstream
PLOu	Physical Layer Overhead
PLSu	Power Leveling Sequence upstream
PMD	Physical Medium Dependent
PON	Passive Optical Network
POTS	Plain Old Telephone Service
Port-ID	Port Identifier
PSN	Packet-Switched networks
SCES	Structured Circuit Emulation Service
SCMA	Subcarrier Multiple Access
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDTV	Standard Definition Television
SF	Superframe
SOH	Section Overhead
SONET	Synchronous Optical Networking
STM-1	Synchronous Transport Module Level-1
TC	Transmission Convergence
TDM	Time Division Multiplexing
TDMoGEM	TDM over GEM
TDMA	Time Division Multiple Access
TDMA	Time Division Multiple Access
TSI	Time Slot Interchange

TUG-x	Tributary Unit Group - x
UCES	Unstructured Circuit Emulation Service
TU-x	Tributary Unit - x
VC-x	Virtual Container - x
VDSL	Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line
VoD	Video on Demand
WDMA	Wavelength Division Multiple Access
WiFi	Wireless Fidelity
WiMax	Worldwide Interoperability for Microwave Access

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As companhias especializadas em comunicações de dados perceberam a crescente demanda dos usuários pela utilização da Internet, tendo em vista um ambiente global, com rede convergente de voz, vídeo e dados, compondo um cenário onde o acesso à informação tornou-se crítico. Assim, o segmento de acesso da rede foi renomeado para “primeira milha”, para realçar sua prioridade e importância [1].

Atualmente as redes de acesso estão divididas em duas categorias: com cabeamento e sem fio. A maior parte da infraestrutura de redes de acesso utiliza tecnologia cabeada, empregando par de cobre trançado (tecnologia xDSL – *Digital Subscriber Line*) ou cabos coaxiais com modem (usando protocolo DOCSIS – *Data Over Cable Service Interface Specification*). A tecnologia ADSL (*asymmetric DSL*) oferece taxa de transmissão de até 6 Mb/s na direção descendente (*downstream*), alcançando distâncias de até 4 km, enquanto a VDSL (*Very high speed DSL*) pode transmitir até 50 Mb/s para distâncias de até 500 m [2]. A tecnologia de modem a cabo é tipicamente um sistema híbrido que utiliza cabo coaxial e fibra (HFC - *Hybrid Fiber Coax*). A fibra óptica é utilizada para interligar a central com os nós remotos, e o cabo coaxial para interligar os nós remotos com os usuários. Nessas redes, a taxa máxima de transmissão na direção *downstream* é 2,8 Gb/s e 150 Mb/s na direção ascendente (*upstream*). Porém, como 500 a 1000 assinantes compartilham a largura de banda dentro de uma célula, a taxa garantida por assinante é comparável com a taxa oferecida por x-DSL [3]. Para solucionar o problema causado pelo gargalo apresentado nessas infraestruturas foram propostas novas tecnologias em redes de acesso baseadas em fibra óptica (redes com fio) e sistemas sem fio (WiFi, WiMax) [2], [4].

A Tabela 1 apresenta os diferentes requisitos de largura de banda dos serviços oferecidos pelas operadoras de telecomunicações. O serviço de voz requer uma largura de banda pouco menor que 100 kb/s. No entanto, os serviços de televisão de alta definição HDTV (*High Definition Television*) e televisão padrão SDTV (*Standard Definition Television*) necessitam de uma largura de banda de até 20 Mb/s e 2 Mb/s, respectivamente.

Com as novas técnicas de codificação, esses valores podem ser reduzidos a 10 Mb/s para HDTV e 1,5Mb/s para SDTV.

Tabela 1: Demanda de largura de banda de vários serviços [5]

Serviço	Largura de Banda (Mb/s)
2 x HDTV	40
2 x SDTV	4
Som com qualidade de CD	0,2
Telefonia	<0,1
Navegação pela web	10 (máx.)
TOTAL	54,3

Desta forma, tem sido estimulada a pesquisa e o desenvolvimento de novas gerações de redes de acesso capazes de suportar esse novo tipo de fluxo de informação. Neste contexto, surge um modelo baseado em uma infraestrutura óptica chamada redes PON (*Passive Optical Network*).

As tecnologias PON são investigadas desde meados dos anos 90, mas nos últimos anos o padrão comercial tem sido amadurecido e as redes estão sendo implantadas. O primeiro de todos os padrões PON foi o ATM PON (APON), que evoluiu para *Broadband* PON (BPON). *Ethernet* PON (EPON) e novas gerações, *Gigabit Ethernet* PON (GEPON) são alternativas para redes PON. O padrão *Gigabit* PON (GPON) é uma “evolução” do A/BPON, permitindo taxas de transmissão de aproximadamente 2,5 Gb/s, destacando-se como uma solução para as redes de acesso, pois possibilita uma infraestrutura com melhor custo benefício para as operadoras de telecomunicações [6].

Neste trabalho abordaremos as arquiteturas PON com ênfase na estrutura de transmissão do legado das redes de telefonia, baseado na técnica de multiplexação por divisão de tempo, TDM (*Time Division Multiplexing*) Nativo (estruturado/canalizado) sobre redes GPON. Essa reorganização e redistribuição se fazem necessárias, pois trafegam pela rede sinais digitais sem e com sincronismo – estes últimos provenientes da rede digital síncrona (SDH – *Synchronous Digital Hierarchy*). Por sua vez, uma rede SDH transporta canais de voz no padrão legado conhecido como E1 de 2,048 Mb/s, composto por 32 canais de 64kb/s. Caso seja construída uma rede GPON com seu limite de ONUs (*Optical Line Unit*) estabelecido (128), havendo apenas um sinal STM-1 (*Synchronous Transport Module Level-1*), composto por 63 canais E1, na entrada do sistema (definido para estruturação deste trabalho), e

desejando-se entregar 1 (um) E1 para cada usuário final, seriam necessários: (i) 128 canais E1 (2 STM-1 ainda não atenderiam a esta demanda); ou (ii) **o fracionamento dos canais E1** provenientes do STM-1, que é a base da proposta deste projeto.

Os capítulos seguintes estão organizados desta forma: O capítulo 2 descreverá as redes de acesso de banda larga (PON), de baixo custo de implementação, existentes no mercado; os equipamentos utilizados em sua infraestrutura, suas topologias mais utilizadas e as técnicas de acesso múltiplo e multiplexação. O Capítulo 3 apresenta os tipos de transporte TDM em redes GPON. O capítulo 4 aborda, de forma detalhada, como se dará o possível fracionamento do canal E1 para transporte de forma estruturada/canalizada. O Capítulo 5 é destinado à estrutura da implementação, a fim de transportar o tráfego TDM sobre GPON de forma nativa e estruturada/canalizada, desenvolvida em HDL (*Hardware Description Language*) para implementação nas FPGAs (*Field Programmable Gate Array*) da OLT (*Optical Line Terminal*) e ONU (*Optical Network Unit*).

CAPÍTULO 2

REDES ÓPTICAS DE ACESSO

A evolução das redes de telecomunicações se deve principalmente ao fato de que, pela crescente demanda por largura de banda, operadoras e usuários necessitam de um serviço que seja oferecido de forma mais eficiente e robusta. Esta característica torna o estudo por novas soluções de acesso à fibra uma premissa para o progresso, neste quesito. Assim, as redes ópticas passivas se tornam atraentes por apresentarem baixo custo e alta eficiência na distribuição do conteúdo (Voz, Vídeo, Dados).

2.1. Topologias das redes PON

Existem três topologias comuns, utilizadas para redes PON, conhecidas como: anel, árvore e barramento [7]. A proposta ideal para a divisão de potência inclui a busca pela melhor eficiência na distribuição da largura de banda entre OLT e ONUs e a redução dos gastos com instalação de novas fibras [8]. Todas as transmissões dentro de uma rede PON são realizadas entre a OLT e a(s) ONU(s).

2.1.1. Topologia em árvore

Fisicamente, uma PON pode ser baseada em uma topologia em árvore (Figura 1). A razão para esta topologia é a formação de uma rede segundo a qual um único CO está em comunicação com usuários geograficamente dispersos, porém reunidos numa mesma área [9]. É a topologia mais utilizada em redes de acesso e utiliza uma única fibra da OLT a um ponto de divisão intermediário (*Splitter*). A partir desse ponto de separação, há uma fibra para cada ONU [8]. A principal vantagem da topologia em árvore é que a divisão se concentra em um único ponto, tornando mais simples a detecção de algum problema na rede [9].

Figura 1: Topologia em árvore.

2.2.2. Topologia em anel

A topologia em anel (Figura 2) é utilizada principalmente em redes metropolitanas porque ela oferece uma alta capacidade com um número mínimo de enlaces. Como existem dois caminhos possíveis para transmissão de dados pela OLT, ainda será possível mantê-la funcionando caso uma das fibras seja interrompida. Entretanto, será necessário o uso de duas fibras e de equipamentos (OLTs e ONUs), capazes de enviar e receber sinais nos dois sentidos do anel [8].

Figura 2: Topologia em Anel.

2.3.3. Topologia em Barramento

A topologia em barramento (Figura 3) também faz uso de apenas uma fibra para interligar OLT e ONUs, assim como a topologia em árvore. Cada ONU está ligada à rede através de um acoplador derivativo, que extrai uma pequena parte do sinal que está sendo transmitido e o entrega à ONU.

Figura 3: Topologia em Barramento.

2.2. Componentes de uma rede PON

Nesta seção, serão apresentados os componentes principais de uma rede PON, que são: OLT, *Splitter*, ONU e/ou ONT¹. Para simplificar as abordagens seguintes, adotaremos o mesmo significado para ONT e ONU, entretanto, será apresentada a seguir descrição de ambas, distintamente.

2.2.1. Terminal de Linha Óptico (OLT)

A OLT é o equipamento responsável pelo fluxo bidirecional de informações através da rede e está localizado no escritório central (CO). É capaz de realizar a multiplexação dos dados dos diversos usuários da rede. Na direção de *downstream*, a função de uma OLT é a de entregar o tráfego de voz, vídeo, dados, por um longo caminho; distribuindo-o às ONUs através da rede. No sentido de *upstream*, uma OLT recebe e distribui múltiplos tipos de tráfego de voz e dados a partir dos usuários da rede [11]. Um OLT pode ser capaz de suportar distâncias de transmissão de até 20 km através do ODN (*Optical Distribution Network*) [12],[13].

2.2.2. Unidade de Rede Óptica (ONU)

A ONU é usada em um cenário FTTC (*Fiber to the Curb*), onde a fibra vai até o meio fio (calçada), e faz a junção no fornecimento do circuito local (proveniente da OLT) sobre a

¹ Uma ONT é uma ONU usada para cenários FTTH (*Fiber to the Home*) que incluem a função de porta para o usuário [17]

rede de TV a Cabo (Cabo Coaxial) ou em redes de telecomunicações convencionais (Cabo UTP) [14]. A ONU também é usada em um cenário FTTN (*Fiber to the Neighborhood*), em que ela está posicionada em um local central no bairro. Embora este cenário (FTTN) maximize a utilização da infraestrutura existente, reduzindo os custos associados à substituição dos cabos, esta opção, até certo ponto compromete o desempenho da rede. Uma ONU geralmente é instalada em um abrigo de equipamento ao ar livre (armário) [11].

2.2.3. Terminal de Rede Óptica (ONT)

Uma ONT é usada para encerrar o circuito no interior do perímetro em um cenário FTTP (*Fiber to the Premises*), também conhecido como FTTH (*Fiber to the home*) – situado nas instalações do cliente – e FTTB (*Fiber to the Business*) – servindo de interface entre a fibra óptica e o cobre. Esta abordagem maximiza as vantagens de desempenho na transmissão pela fibra [14].

2.2.4. Splitter

O Divisor Óptico Passivo (Figura 4) situa-se no circuito local, entre o OLT e a ONU. O *Splitter* divide o sinal de *downstream*, que parte do OLT, em vários outros sinais. *Splitters* ópticos normalmente são desenvolvidos utilizando múltiplos divisores de potência cascadeados na razão 1:2, onde o sinal de entrada é dividido em duas saídas, introduzindo assim uma perda de divisão (razão entre o sinal de entrada e o sinal de saída) de 3,0dB[12], [14].

Figura 4: *Splitter* Óptico [12].

2.2.5. Distribuidor de rede óptica (ODN)

É uma parte da arquitetura externa da planta. A ODN (*Optical Distribution Network*) (Figura 5) consiste de todo o cabo de fibra óptica e dos aparelhos necessários para conectar a sala do equipamento central e o usuário final. Todos os padrões PON (ITU-T) apresentam três classes do *design* da camada óptica de transmissão com diferentes atenuações da distribuição óptica (ODN) entre ONU e OLT [15].

Figura 5: Rede PON.

2.3. Técnicas de Acesso Múltiplo em Redes PON

O tráfego *downstream* gerado em uma rede PON segue da OLT até a ONU (em *broadcast*) e, ao passar pelo *splitter*, é dividido e distribuído para as ONUs presentes no cenário. No sentido inverso (*upstream*), o tráfego é enviado da ONU para a OLT. Neste caso, é necessária a implementação de uma técnica de acesso múltiplo precisa, a fim de evitar colisões dos fluxos gerados pelas ONUs. Quatro técnicas de acesso múltiplo foram desenvolvidas para utilização em redes ópticas passivas (PON) [15]. São elas:

- TDMA (*Time Division Multiple Access*)
- SCMA (*Subcarrier Multiple Access*)
- WDMA (*Wavelength Division Multiple Access*)
- OCDMA (*Optical Code Division Multiple Access*)

2.4. Redes ópticas passivas - PON

Usuários buscam cada vez mais serviços que demandam alta largura de banda, tais como: vídeo de alta qualidade, VoD (*Video on demand*), IPTV (*Internet Protocol Television*), etc. Para atender a esta exigência, as operadoras foram obrigadas a voltar suas atenções para o desenvolvimento de novos equipamentos. Dentre as tecnologias desenvolvidas, a rede PON se destaca pelo fato de que, além de atender às reivindicações dos usuários por alto desempenho da rede, também atende às premissas das operadoras com relação aos custos da tecnologia implantada. Elas (operadoras) desejam minimizar o custo da implantação dos equipamentos de acesso enquanto maximizam as receitas provenientes dos serviços [7]. As redes PONs são consideradas a solução mais promissora para prover banda larga para usuários finais [8].

Uma rede PON (Figura 6) é uma rede que trafega dados no domínio óptico entre dois terminais: a OLT (*Optical Line Terminal*) e a ONU/ONT (*Optical Line Unit / Optical Network Terminal*), e o caminho de transporte do sinal é passivo.

A primeira PON surgiu em meados de 1995, desenvolvida pelo FSAN (*Full Services Access Network*), e ficou conhecida como APON (*ATM on Passive Optical Network*), seguidas da BPON (*Broadband PON*) e GPON (*Gigabit PON*). Em paralelo, no ano de 2001, foram iniciados os trabalhos com Ethernet sobre PON (EPON) pelo grupo de estudos IEEE (802.3ah) e foram finalizados em junho de 2004 [16]. Um sistema PON é composto por: um Terminal de Linha Óptico (OLT), um Divisor Óptico (*Splitter*), encontrado em um nó remoto e múltiplas Unidades de Rede Óptica / Terminais de Rede Óptica (ONUs/ONTs) próximas aos assinantes [8], conforme mostrado na Figura 1.

As duas tecnologias que mais ganham mercado atualmente são: GPON (América e Europa) e EPON (Ásia).

Figura 6: Rede PON

2.5. APON/BPON

O APON foi criado para prover o transporte ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) em redes ópticas passivas, desenvolvida pelo *Full Service Access Networks* (FSAN) e mais tarde seria alterado para BPON. Essa mudança aconteceu pelo fato de que, com a utilização da nomenclatura APON, usuários eram levados a imaginar que apenas seria transportado o padrão ATM sobre a rede. Com isso, os sistemas baseados em BPON eram descritos com capacidade de transportar mais serviços, incluindo os de Ethernet, distribuição de vídeo e serviços de alta velocidade [7]. O FSAN não é um órgão de padronizações, é composto pelas maiores operadoras e fornecedores de sistemas de telecomunicações. Em 1997, o grupo FSAN submeteu as especificações e propostas sobre o BPON ao ITU-T para ratificação formal. Este sistema foi padronizado pelo ITU-T (G.983) [7].

O Padrão G.983, publicado em 1998, definiu as taxas de 155,520 Mb/s e 622,080 Mb/s para operação. Uma nova versão da padronização, publicada em 2005, adiciona a taxa de transmissão em *downstream* de 1244,16 Mb/s [17]. A Tabela 2 sumariza as taxas do BPON:

Tabela 2: Taxas de Bits de *Downstream* / *Upstream* em redes BPON [8].

<i>Downstream</i>	<i>Upstream</i>
155,520 Mb/s	155,520 Mb/s
622,080 Mb/s	155,520 Mb/s
622,080 Mb/s	622,080 Mb/s
1.224,160 Mb/s	155,520 Mb/s
1.224,160 Mb/s	622,080 Mb/s

Como o ATM, BPON é baseado no protocolo de camada MAC (*Media Access Control*) [18]. O formato básico do quadro é formado pela taxa de linha do STM-1 que é de 155,520 Mb/s [17]. Na direção *Downstream*, o quadro consiste em 56 células e cada célula contém 53 octetos. Todos os quadros são iniciados com uma célula PLOAM (*Physical layer operations, administration, and maintenance*) seguida de 27 células ATM. A 29ª célula e ainda uma célula PLOAM são seguidas por outra sequência de 27 células ATM [19].

Figura 7: Formato do quadro BPON (*Downstream* e *Upstream*) na taxa de 155,520 Mb/s. Para taxas de 622,080 Mb/s e 1244,160 Mb/s, o número de *time slots* é multiplicado por 4 ou 8 para o número mostrado na figura [8].

2.6. EPON

Os conceitos para o padrão EPON foram desenvolvidos pelo grupo de estudos IEEE 802.3ah (iniciados em março de 2001 e finalizados em junho de 2004) [20]. A expansão do uso Ethernet, nas redes locais e redes metropolitanas, tornou atraente o uso desta tecnologia em redes de acesso. Este método encapsula e transporta dados em quadros Ethernet e, de forma simples, transporta IP (*Internet Protocol*) em um link Ethernet.

O protocolo de transporte EPON é baseado na estrutura de quadro padrão Ethernet. Explora técnicas TDM (*Time Division Multiplexing*) para *downstream* e técnicas TDMA (*Time Division Multiple Access*) para comunicações *upstream* [19]. A velocidade de transmissão é simétrica (*downstream* e *upstream*), a 1Gb/s com codificação 8B/10B (onde grupos de 8 bits são codificados em um sinal de 10), resultando em taxas de linha de 1,25 Gb/s [18].

Na direção *downstream* (OLT para ONU - Figura 3 (a)), quadros Ethernet são transmitidos da OLT até um *splitter* e entregues a cada ONU. O fator de divisão do *splitter* varia entre 8 e 64. Os pacotes são transmitidos pela OLT e extraídos pelas ONUs destinatárias, baseados em uma LLID (*Logical Link Identifier*), no qual a ONU é alocada quando ela é registrada na rede [18].

Na direção *upstream* (da ONU para a OLT - Figura 3 (b)), os dados provenientes de uma ONU são entregues à OLT [7]. Neste sentido, o comportamento do EPON é semelhante ao de uma arquitetura ponto-a-ponto. Entretanto, ao contrário de uma rede ponto-a-ponto, no EPON todas as ONUs pertencem a um mesmo domínio de colisão – pacotes de dados de diferentes ONUs são transmitidos simultaneamente, havendo a possibilidade de colidirem. Portanto, o EPON necessita de um mecanismo anticolisão realmente eficiente.

2.7. GPON

Em meados de 2001, o FSAN iniciou um esforço para padronizar uma rede de acesso capaz de suportar requisitos de alta largura de banda para serviços residenciais e empresariais; e, também, melhorar o sistema PON já existente (BPON), levando em consideração os serviços a serem atendidos, políticas de segurança e a infraestrutura da fibra óptica [19]. Este sistema ficaria conhecido como *Gigabit-capable Passive Optical Networks* ou Rede Óptica Passiva com capacidade Gigabit (GPON) [9].

Para atender à crescente demanda e lidar com as mudanças nas tecnologias de comunicação, o ITU-T criou uma série de normas para padronização do (GPON) [15], [12], [21], [22]. A Tabela 3 mostra um breve resumo das recomendações G.984.x (GPON):

Tabela 3: Características das recomendações ITU-T G.984.x [15]-[23]

Recomendação ITU-T	Características
G.984.1 <i>Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): General characteristics</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Fornece um resumo das características fundamentais do GPON • Taxas de 1,244/0.155 até 2,488/2,488 Gb/s • Alcance físico máximo de 20km, Alcance lógico máximo de 60km

G.984.2	<i>Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Physical Media-Dependent (PMD) layer specification</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Fornece especificações da camada PMD (<i>Physical Medium Dependent</i>)
G.984.3	<i>Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Transmission convergence layer specification</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Fornece especificações da camada TC (<i>Transmission Convergence</i>) • ATM-mode, GEM-mode (<i>G-PON Encapsulation Method –mode</i>) ou <i>dual mode</i> de operação • Segurança AES (<i>Advanced Encryption Standard</i>) • Meios de controle de acesso baseado em ponteiros
G.984.4	<i>Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): ONT management and control interface specification</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Fornece suporte de gerenciamento/controle da ONT

O Protocolo de transporte GPON explora as técnicas de TDM no sentido *downstream* e técnicas TDMA na direção *upstream*. O padrão GPON define as taxas nominais indicadas na Tabela 4.

2.7.1. Estrutura GPON

Partindo do CO (*Central Office*), apenas uma fibra irá até os divisores passivos. Neste ponto, há uma divisão óptica do sinal em N caminhos distintos para o assinante. O fator de divisão varia e pode chegar até 128. A partir da divisão do sinal, uma fibra será destinada a uma ONU. Quanto à taxa de transmissão, como ilustrado na Tabela 4, existem algumas possibilidades de configuração, e são possíveis quaisquer combinações entre elas, exceto 1,2Gb/s para *downstream* e 2,4Gb/s para *upstream* (a combinação mais usada é a de 2,4Gb/s para *downstream* e 1,2Gb/s para *upstream*) [21]:

Tabela 4: Taxas de transmissão da rede GPON.

Transmissão	Taxa
<i>Downstream</i>	1244,16 Mb/s
	2488,32 Mb/s
<i>Upstream</i>	155,52 Mb/s
	622,08 Mb/s
	1244,16 Mb/s
	2488,32 Mb/s

Quanto aos comprimentos de onda utilizados, os valores são os seguintes [21]:

- 1480nm a 1500nm para *downstream*
- 1260nm a 1360nm para *upstream*

São utilizados, com maior frequência, os comprimentos de onda de 1310nm para *upstream* e 1490nm para *downstream*.

2.7.2. Quadro GTC (G-PON *Transmission Convergence*)

O Quadro GTC oferece capacidade de multiplexação e funções OAM (*Operation, Administration and Maintenance*) embutidas para garantia de *time slots* e alocação dinâmica de banda (DBA). A inserção do OAM é feita no cabeçalho do quadro GTC [21].

2.7.3. Estrutura do quadro *downstream* em GPON

O Tráfego de *downstream* é distribuído da OLT para todas as ONUs em formato TDM. Cada ONU deverá possuir apenas uma cota em cada *frame*, que é assegurada pela codificação. O *Frame* de *downstream* consiste de: PCBd (*Physical Control Block downstream*), uma parte ATM e uma parte do GEM (*GPON Encapsulation Method*). O *Frame* de *downstream* fornece uma sinalização temporal de referência comum para *upstream*. As Figuras 9, 10 e 11 ilustram a estrutura do *frame* de *downstream*. A duração do quadro é de 125 μ s para qualquer taxa de descida. Se não existirem dados a serem enviados, o quadro *downstream* ainda será transmitido a fim de manter o tempo de sincronismo [21].

Figura 9: Quadro de downstream GTC TC [21].

Figura 10: GTC TC Physical Control Block *downstream* [21].

Figura 11: Estrutura de alocação do mapa de largura de banda GTC [21].

2.7.4. Estrutura do quadro *upstream* em GPON

O Tráfego *upstream* usa TDMA, sob controle da OLT alocada na CO, que tem por finalidade atribuir *slots* de tempo com comprimentos variáveis para cada ONU, a fim de transmitir os dados em forma de rajadas síncronas. O Quadro *upstream* consiste em múltiplas transmissões em rajada. Cada rajada *upstream* contém um número mínimo de PLOu (*Physical Layer Overhead*). Além do *Payload* (Carga útil), o *upstream* também pode conter as seguintes

seções: PLOAMu (*Physical Layer Operations, Administration and Management upstream*) PLSu (*Power Leveling Sequence upstream*) e DBRu (*Dynamic Bandwidth Report upstream*).

O Diagrama estrutural do quadro *upstream* é mostrado nas Figuras 12 e 13. O comprimento do quadro é o mesmo que no *downstream* em qualquer taxa. Cada quadro contém um número de bits a serem transmitidos a partir de uma ou mais ONUs. O BWmap (*Bandwidth Map*) dita o arranjo dessas transmissões. Durante cada acordo de alocação periódica para o controle da OLT, a ONU pode enviar de um a quatro tipos de cabeçalhos PON, além dos dados dos usuários [21].

Figura 12: Estrutura do quadro *upstream* em GPON [21].

Figura 13: Detalhe do cabeçalho de *upstream* [21].

2.7.5. Transmissão GPON

O GPON usa o GEM, no qual os dados são encapsulados para serem distribuídos pela rede. O GEM é baseado no padrão ITU GFP (ITU-T G. 704.1), especificação para o envio de pacotes IP sobre redes SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*), com algumas pequenas alterações para torná-lo mais otimizado à topologia PON. Ele provê um mecanismo genérico adaptativo para tráfego com uma maior variedade de serviços na rede.

Uma vez que o GEM fornece um mecanismo genérico para o transporte de diferentes serviços de maneira simples e eficiente através de uma rede de transportes síncrona, o

recomendado é que esta (a rede) use a camada GPON TC (GPON *Transmission Convergence*) [21]. Além disso, a camada GPON TC é sincronizada naturalmente, utilizando o padrão estrutural do SONET 8 kHz (125 μ s), permitindo o suporte a serviços TDM [21].

2.7.6. Segmento GEM

O GPON suporta dois métodos de encapsulamento: O ATM e o GEM. Com o GEM, todo o tráfego é mapeado através da rede usando-se uma variante do SONET/SDH, o GFP. O GEM suporta o transporte nativo de voz, vídeo, e dados sem a adição de camadas de encapsulamento ATM e IP. O GPON suporta taxas de *downstream* tão altas quanto 2,5Gb/s e taxas de *upstream* que variam de 155Mb/s a 2,5Gb/s.

2.7.7. Mapeamento de Quadros GEM no *Payload* do GTC

O Tráfego GEM é transportado mediante o protocolo GTC de forma transparente. No sentido *downstream*, os quadros são transmitidos da OLT para as ONUs utilizando a parte da carga útil do GEM. A OLT pode atribuir toda a duração necessária no sentido *downstream*, até preencher quase todo o quadro *downstream*. A subcamada do quadro da ONU filtra os quadros recebidos com base no Port-ID (*Port Identifier*), e os entrega adequadamente ao cliente GEM da ONU.

No sentido *upstream*, os quadros são transmitidos das ONUs para a OLT utilizando a atribuição de tempo GEM configurada. A ONU armazena na memória os quadros GEM conforme eles chegam, e os transmite em rajadas, durante os tempos atribuídos para eles, pela OLT. A OLT recebe os quadros e os multiplexa junto com as rajadas provenientes das outras ONUs, repassando-os ao cliente GEM da OLT [21].

CAPÍTULO 3

TRÁFEGO TDM EM REDES GPON

Neste capítulo serão abordados os tipos de tráfego TDM em redes GPON. Atualmente dois grandes modos de transporte TDM sobre GPON ganham maior notoriedade: CESoGPON (*Circuit Emulation Service over GPON*) e o TDM Nativo. Este segundo se tornará o foco deste trabalho, pois, atualmente, apenas seu modo não estruturado é tratado.

3. REDE GPON

O transporte TDM, em redes GPON, se divide em duas partes: externo e interno à rede (GPON), como ilustrado na Figura 14.

Figura 14: Estrutura de um equipamento GPON

Os chips “GPON-OLT” e “GPON-ONU” são responsáveis pelo encapsulamento GEM. O *Fractional E1 over GEM* fará encapsulamento dos 63 tributários E1 para até 128 ONUs sobre a estrutura do GEM

O tráfego externo se dá através do transporte SDH, mais especificamente pelo STM-1 (*Synchronous Transport Module Level-1* ou Módulo de Transporte Síncrono Nível-1). Este

modelo segue padrões internacionais e, no caso do Brasil, o padrão adotado é o Europeu. Será dado um maior enfoque no detalhamento da formação e fragmentação do quadro E1 para sustentação teórica do projeto.

Internamente, os dados TDM são transportados seguindo a norma ITU-T G.984 e as características do *hardware* padrão para GPON.

3.1. Tráfego Externo

3.1.1. STM-1

Figura 15: Exemplo de estrutura de formação do STM-1

Desde a sua formação, o STM-1 é gerado com características que garantem sua alta capacidade e eficiência na transmissão de dados. O STM-1 é formado por 1830 canais de voz de 64 Kb/s ou por 63 quadros E1 de 2,048 Mb/s.

A construção do STM-1 se dá através de um arranjo de 9 linhas por 270 bytes por 8 Bits (9 x 270 x 8), resultando em um total de 19.440 Bits/quadro. Esse montante de informação está distribuído da seguinte forma:

- Carga útil 2.349 Bytes
- Área de Supervisão (SOH) 72 Bytes
- Ponteiro 9 Bytes

Esses bytes representam, em sua grande maioria, informações dos 32 canais de voz provenientes do E1.

Como exemplo, a formação do quadro STM-1 pode se dar como descrito a seguir e ilustrado na Figura 16: 32 canais de voz são multiplexados, formando um quadro E1. O quadro (E1) recebe 2 bytes de justificação para tributários PDH formando o C-12. Este, por sua vez, recebe um cabeçalho de caminho, recebendo o nome de Container Virtual-12 (VC-12). Ele não sofre modificações no decorrer do transporte (origem e destino). Os VC-12 são transmitidos diretamente no STM-1 e são chamados de Container Virtual (VC) de ordem inferior. Os mesmos são armazenados dentro de Unidades Tributárias (TU-12). O TU, por se tratar de uma unidade tributária de ordem inferior, pode “flutuar” dentro do VC de ordem superior (VC-4) e o início do primeiro (TU-12) é determinado pelo ponteiro adicionado ao segmento VC-12 nesta etapa. Neste ponto existe a multiplexação de 3 Unidades Tributárias, formando o TUG-12 (Grupo de Unidade Tributária). Após esta etapa, existe uma nova multiplexação, agora, partindo de 7 TUG-2 para formar o TUG-3 (Grupo de Unidade Tributária) e é seguida por uma outra, agora de 3 TUG-3 para formar o VC-4. É adicionado aos VC-4 um ponteiro de AU (Unidade Administrativa) para registrar a fase existente entre o container virtual e o quadro, e especifica o início do container virtual. Por fim, adiciona-se à AU o cabeçalho de seção, obtendo com isso o STM-1. A Figura 16 apresenta as etapas dessa estruturação [24].

A taxa de transmissão alcançada pelo STM-1 é de 155,520 Mb/s. O desmapeamento ou desmontagem do STM-1 se dá de forma inversa e as etapas são as mesmas.

Figura 16: Estrutura do quadro STM-1 (2) [24].

3.2. Tráfego Interno

No tráfego interno GPON, duas técnicas de transporte são utilizadas atualmente: O CES (*Circuit Emulation Service*) onde, neste caso, os dados são transportados sobre a interface Ethernet e o TDM Nativo. Neste, os dados são transportados seguindo os critérios da multiplexação original.

3.2.1. CES

Ao contrário das redes comutadas por circuito (CSN - *Circuit-Switched network*), as redes comutadas por pacotes (PSN - *Packet-switched networks*) não possuem estrutura de sincronismo, que é crucial para garantir que sistemas TDM funcionem corretamente e o seu desempenho deve atender às especificações do ITU-T e padrões ANSI (*American National Standards Institute*). Qualquer sistema PON deverá lidar com o sincronismo do tronco TDM [25], como ilustrado na Figura 17.

Os dados que necessitam trafegar em tempo real (como voz e vídeo) têm baixa tolerância a atrasos na sua transmissão. Para voz, o atraso deve ser ≤ 50 ms; para vídeo esta tolerância é um pouco maior, de ≤ 150 ms. Atrasos maiores que 50 ms (para voz) geralmente exigem a utilização de dispositivos canceladores de eco [26]. A CBR (*constant bit rate*) ou taxa de bits constante, fornece características de baixo atraso necessária para esse tipo de tráfego.

Figura 17: *Circuit emulation service* através de uma rede comutada por pacote [27].

3.2.2.1. CES Estruturado

O CES estruturado ou SCES (*Structured Circuit Emulation Service*) foi projetado para emular conexões E1 fracionadas ($N \times 64$ Kb/s). Com E1 estruturado sobre CES, as redes podem ser simplificadas, eliminando dispositivos TDM de alocação de largura de banda E1

para PBX e equipamentos de videoconferência [26]. Além disso, o SGCO (*Simple Gateway Control Protocol*) pode ser usado para controlar circuitos CES estruturado para voz [25]. A Figura 18 ilustra este processo.

Figura 18: Formato do pacote CESoPSN estruturado [27], [28].

3.2.2.2. CES Não estruturado

O CES não estruturado ou UCES (*Unstructured Circuit Emulation*), prevê o transporte transparente de fluxo de dados TDM (E1) através de uma rede de pacotes [29]. O serviço mapeia toda a largura de banda necessária para o fluxo E1 em toda a rede de pacotes e não fornece mecanismos para a localização de enquadramento ou estruturas de dados impostas ao fluxo de bits TDM. O UCES é muitas vezes referido como “canal limpo” porque ele transporta todas as estruturas possíveis (SF - *Superframe*, FSE - *Extended Superframe*, G.704, etc.) imposta ao fluxo de dados TDM de forma transparente através da rede de pacotes [30]. A Figura 19 ilustra do CESoPSN não estruturado.

Figura 19: Formato do pacote CESoPSN não estruturado [27], [28].

3.2.2.3. CESoGPON

O CESoGPON (CES *over* GPON) refere-se à prestação de serviços TDM sobre GPON usando a tecnologia CES, conforme ilustra a Figura 20. Essencialmente, a rede de acesso GPON é considerada como sendo uma “nova” estrutura Ethernet através da qual o tráfego

TDM é encapsulado usando emulação de circuitos [25].

Figura 20: CESoGPON [31].

O CESoGPON introduz cabeçalhos nos pacotes, que consomem uma determinada largura de banda. Dependendo do modo utilizado, o tamanho do *payload*, a largura de banda do cabeçalho é de, pelo menos, 4% [32]. O CES também requer um tempo finito para empacotamento e reorganização do fluxo TDM, inserido e/ou extraído do pacote. O atraso fim-a-fim (não incluindo a latência introduzida pelo GPON) pode ser reduzida abaixo de 1 milissegundo, dependendo da configuração do CES e do GPON [31].

Uma vantagem proporcionada pelo CESoGPON é a sua possibilidade de entrega de serviços E1 de forma fracionada ou no nível de granularidade DS0. Isto é, além de suporte para E1 não estruturado (canal limpo), o transporte de $N \times 64$ kb/s canais (estruturado) também pode ser oferecido. O transporte de serviços E1 de forma fracionada compõe a maioria dos serviços TDM e é uma parte essencial de uma oferta de serviços para os usuários comerciais [25].

3.2.2. TDM Nativo

O tráfego de dados em formato TDM (nativo) permite que haja uma estrutura de sincronismo, oriundas das redes comutadas por circuitos (CSN). Neste tipo de transporte, os dados são altamente sensíveis às variações de latência, e, com isso, a introdução de atrasos

além do atraso de propagação ameaça a sua disponibilidade e a sua integridade [19]. Em sistemas GPON, esse fluxo de dados também é conhecido como TDM *over* GEM ou TDM *over* GPON.

3.2.2.1 TDM sobre GEM

Também conhecido como TDM *over* GEM (TDMoGEM), este procedimento utiliza quadros GEM de tamanho variável para encapsular o tráfego TDM. Os dados TDM são empacotados no GEM como mostra a Figura 21. Os pacotes de dados TDM com o mesmo Port-ID são concentrados na parte superior sobre o TC (*Transmission Convergence*). A seção de carga útil conterá L bytes do fragmento TDM [21].

Figura 21: Estrutura do quadro de dados TDM no quadro GEM [21].

O tráfego TDM é mapeado no quadro GEM, permitindo que o tamanho do quadro varie de acordo com o deslocamento da frequência deste. O tamanho do fragmento TDM é indicado pelo campo PLI (*Payload Length Indicator*).

O processo de adaptação da fonte TDM enfileira os dados de entrada em uma memória interna e, uma vez por quadro (i.e. a cada 125 μ s), sinaliza ao objeto multiplexado do quadro GEM o número de bytes que vão ser transportados no quadro (GEM) utilizado. Normalmente, o campo PLI indica um número constante de bytes de acordo com a velocidade nominal do TDM. Entretanto, esporadicamente será necessário transportar um byte a mais ou a menos. Ele será transportado no conteúdo do campo PLI.

Se a frequência de saída é maior que a frequência do sinal de entrada, a memória interna começa a ser esvaziada. O preenchimento da memória poderá ser inferior ao limite mais baixo. Assim, um byte a menos será lido a partir da memória de entrada e o preenchimento da memória ficaria acima do seu limite inferior. Consequentemente, se a frequência de saída for menos que a frequência de entrada, a memória começa a encher. A

memória encheria acima do seu limite superior. Como resultado, mais um byte será lido a partir da entrada e o preenchimento da memória ficará abaixo do seu limite superior.

Na Figura 22 são descritos os conceitos de correspondência dos quadros TDM de comprimento variável na seção de carga útil do quadro GEM [21]. A Figura 23 ilustra como os dados são transportados.

Figura 22: Mapeamento TDM sobre GEM [21].

Figura 23: Padrão ITU-T para GPON

3.3. E1 Não estruturado e E1 Estruturado

A interface E1 é dividida em 32 intervalos de tempo ou quadros. Cada um dos 32 *slots* de tempo é formado por um quadro de 8 bits que transmite dados a 64 kb/s. Cada um desses intervalos de tempo pode ser configurado para transportar dados ou voz.

3.3.1. E1 Não estruturado

Serviço não estruturado, também conhecido como serviço não canalizado, aceita tráfego TDM, agrupando todo o quadro E1 sem levar em conta a estrutura dos dados dentro do circuito [33]. Desta forma, o serviço não canalizado pode ser imaginado como uma transferência bit a bit [25]. Por exemplo, no modo não estruturado, um circuito E1 é considerado como um fluxo de bits de 2,048 Mb/s, sem levar em conta a posição dos bits de alinhamento ou de canais de dados no fluxo de bits [34].

Este modo recebe esta designação por não reconhecer a estrutura do quadro (E1), onde a rede simplesmente transmite o fluxo de bits como em uma linha dedicada, sem observar a estrutura do quadro [35]. A estrutura do quadro não é reconhecida, nem utilizada.

Figura 24: E1 Não estruturado

3.3.2. E1 Estruturado

Serviço estruturado, também conhecido como serviço canalizado, utiliza de informações em nível de canal ou a informação em nível DS0. O serviço é capaz de comutar e reorganizar o tráfego. Este serviço suporta arranjos de $N \times 64$ kb/s canais, também conhecidos como serviço fracionado, permitindo às operadoras disponibilizarem serviços em nível DS0 [25].

A norma ITU-T G.704 (*Synchronous frame structures used at 1544, 6312, 2048, 8448 and 44 736 kbit/s hierarchical levels*) define uma especificação de enquadramento para a norma ITU-T G.703 (*Physical/electrical characteristics of hierarchical digital interfaces*). A estrutura do quadro E1 utiliza de um *time slot* de 64 kb/s (*time slot 0*), dentro da taxa total de 2,048 Mb/s, para sincronismo de quadro. O resultado é que os demais 31 *time slots* ficam disponíveis para tráfego de dados ou voz, o que equivale a uma largura de banda de 1.984 Mb/s (Figura 25) [12]. Caso o canal 16 seja utilizado para sinalização CAS (*channel associated signaling*) essa taxa cai para 1920 Mb/s.

Figura 25: E1 Estruturado

3.3.2.1. Formação

O sistema de voz faz uso da tecnologia TDM para processamento e envio do sinal através da rede. Neste método, o sinal de voz é amostrado a uma taxa de 8kHz em intervalos de 125μs para ser transportado pela rede de forma digital. Essa amostragem é feita utilizando 8bits, num total de 64kb/s (E0) para seu tráfego. Seguindo o esquemático do transporte SDH adotado no Brasil (padrão europeu), 32 canais de voz são multiplexados para formarem troncos E1 (*European format for digital transmission*) compostos por 32bytes, trafegando a uma taxa de 2,048 Mb/s (Figura 26). Destes 32 canais, o primeiro (*time slot 0*) é destinado ao alinhamento do quadro. Através deste alinhamento é possível saber onde inicia e onde termina um quadro (E1). Já o canal 16 (*time slot 16*) é utilizado para a sinalização dos 30 canais (para voz) existentes no tronco [36], caso seja utilizada a sinalização por canal associado (CAS).

Figura 26: Quadro E1

3.3.2.2. Multiquadro

Um Multiquadro E1 (Figura 27) é formado pela sequência de 16 quadros (E1), no qual serão transmitidos, além dos canais de voz, os sinais de sinalização desses canais, sincronismo dos quadros e multiquadros e alarmes do sistema.

Figura 27: Estrutura de formação Multiquadro E1

A Figura 28 ilustra as componentes formadoras do Multiquadro E1.

Figura 28: Multiquadro E1

O *Time slot* 0 varia de acordo com o quadro E1 que está sendo transmitido dentro do Multiquadro. Em quadros pares do multiquadro E1, é enviada, no canal 0, uma informação de alinhamento de quadro (utilizada para sincronismo). Nos quadros ímpares, deste mesmo canal, é enviado um bit que é identificado como alarme remoto para o sistema receptor. É enviado também um bit para alinhamento do quadro e outros 5 bits reservados. O *time slot* 16 é destinado ao tráfego de sinalização dos 30 canais de informação (voz) de um quadro E1 (CAS). O canal 16 do primeiro quadro E1 transmite uma palavra de alinhamento de quadro e um bit de alarme de sincronismo do multiquadro. Os outros bits deste canal são reservados. Os demais canais 16 de cada quadro contêm a sinalização dos canais de voz que compõem um quadro E1. O canal 16 do segundo quadro E1 transporta a sinalização associada aos canais 1(um) e 17(dezessete), o canal 16 do terceiro quadro E1 transporta a sinalização associada aos canais 2 (dois) e 18 (dezoito) e assim sucessivamente até o canal 16 do décimo sexto quadro E1, que transporta a sinalização associada aos canais 15 e 31 [36].

CAPÍTULO 4

TDM NATIVO (ESTRUTURADO/CANALIZADO) EM REDES GPON

Foram abordados nos capítulos anteriores os tipos de redes PON existentes comercialmente e as técnicas utilizadas para o transporte TDM em redes GPON. Essas técnicas não apresentam opções de fragmentação do canal E1, em nível de usuário. Neste capítulo será apresentada uma opção para o transporte TDM Nativo que será denominado de “TDM Nativo Estruturado/Canalizado”, tendo por base dois componentes eletrônicos genéricos, aqui denominados “Chip-GPON OLT” e “Chip-GPON ONU”. Projetados a partir de componentes comerciais, os dois *chips* apresentam as funcionalidades necessárias à operação proposta.

Vamos tomar como ponto de partida a técnica TDM Nativo que é eficiente, no que diz respeito à economia de banda (Ethernet, caso fosse utilizado o CES) e por haver um canal designado apenas para este tráfego no GPON.

Será necessária uma abordagem inicial sobre Comutação Digital, com a finalidade de trazer os conceitos deste assunto para âmbito deste projeto. Por não se tratar do foco deste trabalho, o assunto será abordado de forma simplificada.

4.1. Comutação Digital

A função básica de um comutador é a de redistribuir as conexões entre canais e/ou *time slots* transmitidos, quando necessário.

Por não se tratar de um trabalho específico sobre comutação, apresentaremos apenas as características necessárias para o bom entendimento dos procedimentos adotados neste projeto. Adotaremos a nomenclatura “palavra” para designar a informação (byte) contida em determinado *time slot*.

4.1.1. Comutação Temporal

A Comutação Temporal se dá através da transferência das informações de um *time slot* para outro *time slot* (atraso ou adiantamento), distintos no domínio do tempo. Este processo de “troca” é conhecido como TSI (*Time slot Interchange*). Existem duas maneiras para construção de comutadores temporais: o de escrita cíclica e o de leitura cíclica. Comutadores de escrita cíclica trabalham da seguinte forma: os dados recebidos são alocados em uma memória de dados de forma cíclica, seguindo a orientação do endereço da célula da memória de dados. Esta informação (endereço) será usada como referência para a leitura de saída, através da memória de endereços. Assim, a memória de endereço indica o *time slot* que deverá ser lido (entrada), gerando assim uma saída distinta da ordem de entrada (memória de dados). Podemos usar como exemplo o *time slot* 1 (ts1) da Figura 29. Na entrada, o ts1 ocupa o endereço da célula 1. Como a leitura é aleatória (segue orientação da memória de endereços), os dados mudam de *time slot*, neste caso, para o ts31 [38].

Figura 29: Comutador Temporal de Escrita Cíclica

O comutador de leitura cíclica segue o mesmo princípio de funcionamento, diferindo apenas na ordem de entrada e saída dos dados. Neste caso a entrada dos dados é aleatória (segue orientação do endereço da célula) e é escrita de forma cíclica. É importante mencionar que ambos os métodos de comutação temporal podem ser concebidos de duas formas distintas: com bloqueio ou sem bloqueio. Trataremos deste assunto nas seções 4.1.3 e 4.1.4.

4.1.2. Comutação Espacial

O Comutador Espacial é um circuito que usa o princípio da troca de informação entre canais de entrada. Ele transfere as informações de um *time slot*, de determinado *stream* de dados de entrada para outro *time slot*, num outro *stream* de saída. Esses *streams* devem ser distintos entre si. Os dados são armazenados em memórias e, após terminado o ciclo de transferência dos canais de entrada em questão, esta memória é entregue a um canal de saída. A Figura 30 ilustra o funcionamento de um comutador espacial [38]:

Figura 30: Comutador Espacial

Na Figura 30, o funcionamento do comutador espacial se dá da seguinte forma: os canais de entrada são entregues seguindo a ordem da Figura. Cada porta lógica do conjunto do comutador possui um endereço de cruzamento único (naquele instante). Este endereço é ativado quando se necessita estabelecer uma conexão entre os dados de entrada e os dados de saída. A seleção dos endereços se faz através de uma lógica programável pré-definida (através das portas lógicas). Cada *time slot* ocupará um endereço da memória de controle. Quando seu

limite (memória) for atingido, iniciará o processo de transmissão do canal comutado. A memória de controle é ordenada *time slot* a *time slot*.

As entradas E1, E2 e E3 são compostas de canais com 4 *time slots* cada uma. Note que a entrada E4 é constituída por *time slots* vazios, a fim de gerar uma quantidade de saídas (com informação) maior que a quantidade de entradas. Este procedimento será de suma importância para o projeto. O processo de extração dos *time slots* sem informação dos canais de saída será apresentado no capítulo 4.1.3.

4.1.3. Comutação Temporal – Espacial – Temporal (TST)

O Comutador TST é definido pela junção dos comutadores temporais e espaciais. Esta estrutura apresenta (como portas de entrada e saída) múltiplos níveis de comutadores temporais, com um comutador espacial no centro desta estrutura. Esta formatação de comutador apresenta uma característica importante que deve ser abordada, que é o fator “bloqueio” [39].

A Figura 31 ilustra um comutador TST (de 3 linhas de entrada, com 3 *time slots* por linha) com bloqueio. No exemplo em questão, a ideia será alterar a palavra *A* (*time slot*1 – Linha 1) e a palavra *E* (*time slot*3 – Linha 2) de forma temporal e espacial. A palavra *A* deverá ocupar (após percorrer o comutador TST) o *time slot* 2 da linha *N*. Já a palavra *E* deverá ocupar o *time slot* 3 da linha *N*.

Ao atravessar o primeiro TSI (*Time slot Interchange*), a palavra *A* sofre uma comutação temporal (do *time slot* 1 para o *time slot* 3). O comutador espacial, por sua vez, transfere a palavra (*A*) da linha 1 para a linha *N*. No último estágio, o *time slot* em questão sofre um atraso, saindo do *time slot* 3 para o *time slot* 2 da linha *N*. Este procedimento só foi possível porque o *time slot* 3 da linha 1 estava vazio e o *time slot* 2 da linha *N* também. Caso contrário, o procedimento de comutação não seria possível, causando assim um bloqueio, como será apresentado no próximo exemplo.

Agora será feita a comutação da palavra *E*. A finalidade será transportá-la até o *time slot* 3 da linha *N*. Note que no primeiro estágio (TSI) não é possível deslocá-lo no tempo, já que a linha de entrada em questão (2) não possui *time slots* vazios. Na segunda etapa (comutação espacial) a palavra poderia sofrer alteração (para linha 1), mas isto não será

necessário, já que a intenção é alterá-la para a linha N . Como o *time slot* 3 da linha N já está ocupado, este processo não será possível. A última etapa é idêntica (neste caso) à primeira.

Em resumo, para que haja bloqueio em um sistema TST, a quantidade de *time slots* internos (y) deverá ser menor que duas vezes a quantidade de *time slots* de entrada ou saída (x) menos 1, conforme condição proposta por Clos [37]:

$$x < 2y - 1 \quad (1)$$

Figura 31: Comutador TST com bloqueio

Seguindo a lógica anterior, para que um sistema TST seja considerado sem bloqueio, a quantidade de *time slots* internos (y) deverá ser maior ou igual a duas vezes a quantidade de *time slots* de entrada ou saída (x) menos 1. Neste caso, Clos propôs que [37]:

$$x \geq 2y - 1 \quad (2)$$

O exemplo acima apresentava 3 *time slots* de entrada por linha. Para torná-lo um sistema sem bloqueio, segundo a equação (2), teremos:

$$x \geq 2y - 1$$

$$x \geq 2.(3) - 1$$

$$x \geq 5$$

No exemplo da Figura 32 temos um sistema TST sem bloqueio. Neste caso, foram adicionados *time slots* vazios ($x \geq 5$) de forma pseudoaleatória no primeiro estágio de TSI. Esses *time slots* terão a função de tornar o sistema mais flexível a fim de não gerar bloqueios.

Como apresentado no exemplo anterior (com bloqueio), o propósito será o mesmo, i.e., alterar a palavra *A* (*time slot*1 – Linha 1) e a palavra *E* (*time slot*3 – Linha 2) de forma temporal e espacial. A palavra *A* deverá ocupar (após percorrer o comutador TST) o *time slot* 2 da linha *N*. Já a palavra *E* deverá ocupar o *time slot* 3 da linha *N*.

O procedimento de comutação da palavra *A* é idêntico ao exemplo de um sistema TST com bloqueio.

Já a comutação da palavra *E* será distinta. Neste caso (por ter ocorrido a inserção de *time slots* sem informação no segundo estágio - entre o primeiro estágio do TSI e o comutador espacial) a palavra *E* sofrerá um atraso, alternando do *time slot* 3 para o *time slot* 5 da linha 2, após passar pelo primeiro TSI. Em seguida, ela trocará a linha 2 pela linha *N* mantendo a ordem do *time slot* de destino. Por último, os *time slots* sem informação serão removidos, permanecendo apenas os *time slots* com informação. Note que a quantidade de *time slots* de entrada é igual à quantidade de *time slots* de saída. Esta regra deve ser mantida.

Figura 32: Comutador TST sem bloqueio

A técnica de aumento de *time slots* no primeiro estágio da comutação temporal se dá pelo acréscimo da frequência do relógio do comutador (temporal) e decréscimo, no último estágio deste comutador.

4.1.4. Comutação Espacial – Temporal – Temporal (STS)

O Comutador STS é uma associação de comutadores espaciais e temporais, assim como o comutador TST. Neste tipo de comutação (STS) existem dois estágios de comutação espacial (externos) e um estágio interno para comutação temporal [38]. Este tipo de comutador também apresenta bloqueio, que será descrito a seguir.

O exemplo da Figura 33 ilustra o funcionamento de um comutador STS com bloqueio. Neste, se fará necessária o deslocamento da palavra **A** e da palavra **D**. O primeiro, partindo do *time slot* 1 – linha 1 para o *time slot* 1 – linha 2, e o segundo, partindo do *time slot* 2 – linha 2 para o *time slot* 1 – linha 1, conforme indicam as setas.

No primeiro estágio de comutação, a palavra **A** sofre uma comutação entre a linha 1 e a linha 2, devendo permanecer no mesmo *time slot* (neste caso, o *time slot* 1). A palavra **A** não sofrerá alteração estágios seguintes (de comutação temporal e em seguida, comutação espacial) por não haver necessidade.

A palavra **D** partirá do *time slot* 2 – linha 2. No primeiro estágio, por não haver possibilidade de comutação, a palavra permanecerá na linha 2. A ausência de *time slots* vazios (sem informação) na linha 2 fará com que a palavra em questão permaneça no *time slot* 2 ao atravessar o estágio 2. Por fim, a palavra **D** será bloqueada, por não haver a possibilidade de comutação da mesma entre as linhas 2 e 1. Vide Figura 33:

Figura 33: Comutador STS com bloqueio

Como apresentado no comutador anterior (TST), o comutador STS também possui possibilidade de ausência de bloqueio na transferência das informações. Neste caso, a quantidade de linhas internas (K) deverá ser duas vezes a quantidade de linhas externas (N) menos um, segundo a formulação de Clos [37]:

$$K \geq 2N - 1 \quad (3)$$

O exemplo em questão apresenta as seguintes características: 2 linhas de entrada e 2 linhas internas. Para transformar esse sistema em um sistema sem bloqueio, é necessário o acréscimo de uma linha interna, à partir da equação (3), conforme calculo:

$$K \geq 2N - 1$$

$$K \geq 2 \cdot (2) - 1$$

$$K \geq 3$$

A Figura 34 apresenta um sistema de comutação STS sem bloqueio. Note que, de acordo com o cálculo anterior, foi adicionada uma linha de TSI entre os dois comutadores espaciais. Este acréscimo fará com que o sistema deixe de ser “com bloqueio” e passe a ser “sem bloqueio”. O transporte da palavra **A** segue a orientação anterior (com bloqueio). Já o transporte da palavra **D** sofrerá alteração, graças à adição de uma linha de comutação temporal. Nessa nova abordagem, a palavra **D** (no primeiro estágio) será transportado da linha 2 externa para a linha 2 interna (as linhas internas, neste arranjo, passam a ser compostas de 3

linhas). No segundo estágio (TSI), a palavra **D** é adiantada partindo do *time slot* 2 para o *time slot* 1. Por fim, já no comutador espacial, a palavra troca a linha 2 interna pela linha 2 externa de saída.

Figura 34: Comutador STS sem bloqueio

4.2. FPGA

A FPGA (que é um circuito lógico programável composto por um conjunto de células lógicas alocadas em forma de uma matriz, e suas funcionalidades são geralmente configuradas por software [40]) fornecerá a lógica programável, ou IPcore (*Intellectual Property core*), da OLT e ONU a fim de prover o mapeamento/desmapeamento do STM-1 (IPcore Demux SDH) e o encapsulamento dos 63 tributários E1 para até 128 ONUs sobre a estrutura do GEM (IPcore FE1oGEM).

4.2.1. Demux SDH, Interface GEM e FE1oGEM (*Fractional E1oGEM*)

4.2.1.1. Demux SDH

4.2.1.1.1. Downstream

O Demux SDH é responsável pelo o mapeamento/desmapeamento do STM-1 em 63 canais E1. Após este desmembramento, os dados (63 canais E1) são distribuídos de forma paralela e, a partir deste ponto, se dará a fragmentação do E1 conforme ilustra a Figura 35:

Figura 35: FPGA – Downstream (Parte1)

4.2.1.1.2. Comutação dos 63 canais E1

Os dados fornecidos pelo desmembramento do STM-1 (Demux SDH) são alinhados de forma paralela (necessário o uso de *buffer*). Assim, os *time slots* que compõem os 63 canais E1 são distribuídos de forma pré-definida e não homogênea. A programação desta distribuição definirá quantos tributários (*time slots*) seguirão para cada ONU. Isso se faz necessário porque, na estrutura GPON apresentada neste projeto, cada STM-1(63 canais E1) deverá atender a até 128 ONUs, com duas LIU (*Line Interface Unit*) cada.

No exemplo abaixo, será apresentado uma possível forma de fragmentação dos canais E1 (ITU-T G. 704) para atender uma proposta específica. Usaremos uma comutação do tipo TST apenas como exemplo. A comutação STS também pode ser utilizada de igual forma.

v – time slot vazio

Figura 36: Comutação Temporal e Espacial dos 63 canais E1

O primeiro estágio é composto por “N” comutadores temporais (CT), sendo que alguns deles servirão apenas para a criação de *time slots* vazios. Nesta etapa, cada comutador terá a função de criar *time slots* vazios dentro dos seus respectivos canais E1 e/ou atraso/avanço dos mesmos (seguindo uma tabela pré-estabelecida de programação para a distribuição dessas informações). Essas informações passarão por um atraso de quadro de, no máximo, um canal E1 (um quadro). Note, na Figura 36, que cada estágio de comutação possui uma razão na proporção de criação dos canais, para a criação de uma determinada quantidade de *time slots* vazios.

O segundo será o de comutação espacial (CE). Neste, os *time slots* dos canais E1 serão comutados entre si (seguindo programação). Cada *time slot* só será transferido para outro canal caso haja um *time slot* vazio, no mesmo espaço de tempo, no canal (E1) destinatário.

Por fim, o terceiro estágio será de comutação temporal. Aqui, além de ainda poder ser feita alguma comutação temporal, serão excluídos os canais vazios (sem informação) a fim de não aumentar a taxa de bits de saída com informações que não serão úteis.

4.2.1.1.3. Upstream

No sentido de *upstream* (Demux SDH), os dados seguem as mesmas etapas, só que com sentido contrário. As informações chegam a partir da implementação FE1oGEM (*Fractional E1 over GEM*) e logo após, são armazenados em memória (*buffer*) e comutados, conforme Figura 37. O passo seguinte será entregar os dados (em formato de quadro E1) e mapeá-los no formato STM-1.

Figura 37: FPGA – Upstream

4.2.1.2. Interface GEM e IPcore FE1oGEM

A Função da FPGA do lado da OLT, no *downstream*, é mapear os 63 canais E1 provenientes do Demux SDH e entregá-los ao chip GPON-OLT. No *Upstream*, a FPGA desmapeia os canais E1 e os entrega ao Demux SDH. Do lado da ONU, os dados provenientes das LIUs (*Line Interface Unit*) são mapeados no formato do fragmento GEM, para *upstream*. No *downstream*, os dados vindos do chip GPON-ONU são desmapeados e entregue às suas respectivas interfaces de linha. A Figura 38 ilustra as interfaces GEM, disponíveis para serem implementadas nas FPGAs, que vão servir o chip GPON-OLT e o chip GPON-ONU.

Figura 38: Visão geral das interfaces do Chip GPON-OLT e Chip GPON-ONU

A interface GEM permite um canal limpo fim-a-fim entre chip GPON-OLT e chip GPON-ONU. Este canal transporta dados no estilo GEM com taxa de até 155,520Mb/s para o chip GPON-OLT e de até 19,44Mb/s por chip GPON-ONU.

4.2.1.2.1. Interface GEM de *Downstream* do Chip GPON-OLT

A FPGA entrega o tráfego ao chip GPON-OLT (já com seu respectivo *payload* mais alguns bits reservados) e este o distribui pela rede. Cada *payload* só poderá atender a uma ONU e cada ONU pode receber até 2 canais E1. O clock de *downstream* do chip GPON-OLT é de 155,520 MHz (derivado do *clock backbone* TDM/SDH).

4.2.1.2.2. Interface GEM de *Upstream* do Chip GPON-OLT

A FPGA do lado da ONU entrega o quadro FE1oGEM para o chip GPON-ONU, onde é adicionado o Port-ID e bits reservados (Res) criando o fragmento GEM, que é entregue ao chip GPON-OLT. Este processo determina a largura de banda que o chip GPON-OLT disponibilizará a cada chip GPON-ONU, através do envio de Alloc-ID. Uma ONU pode ter maior ou menor prioridade no envio dos seus dados, graças a essa informação. A informação passa pelo chip GPON-OLT e é entregue ao IPcore FE1oGEM da OLT onde são extraídos os

canais E1 e repassados à rede a uma taxa de 2,048 Mb/s +/- 50ppm e estes, entregues ao IPcore STM-1 da FPGA.

4.2.1.2.3. Interface GEM de *Downstream* do Chip GPON-ONU

Os dados disponibilizados pelo chip GPON-OLT (com respectivo Port-ID e Res) são entregues ao chip GPON-ONU e este, por sua vez, remove a informação de cabeçalho (Port-ID e Res), destinando apenas o quadro FE1oGEM à saída da interface da FPGA. Esta, por sua vez, remove os canais E1 e os entrega a suas respectivas saídas de linha (até 2 por ONU) a uma taxa de 2,048 Mb/s +/- 50ppm. O Clock do chip GPON-ONU é derivado do clock *backbone* TDM (de 19.44MHz) e é *gated clock*, ou seja, só existe clock quando existem dados a serem enviados.

Figura 39: Sinal de saída GEM do Chip GPON-ONU

É possível existir uma ordem entre os canais E1 que estão sendo transportados (Ex. E1.1 2 E1.2) ou não (Ex. E1.1 e E1.12), conforme ilustra a Figura 39.

4.2.1.2.4. Interface GEM de *Upstream* do Chip GPON-ONU

Os dados fornecidos pela(s) saída(s) de linha são mapeados pela FPGA da ONU a fim de gerar até dois quadros GEM a uma taxa de 19.44 Mb/s e entregá-los ao chip GPON-ONU, que por sua vez adiciona o Port-ID e Res, formando o fragmento GEM e o envia ao chip GPON-OLT em forma de rajada. O Clock do chip GPON-ONU é derivado do backbone

TDM (de 19.44MHz). O Clock do *upstream* é *gated clock*, ou seja, só existe clock quando existem dados a serem enviados.

4.2.1.3. IPcore FE1oGEM

O IP core do lado da OLT deverá ser capaz de mapear os 128 canais E1 (provenientes do Demux SDH), acrescentando Port-ID (identificação relativa a cada ONU) e alguns bis de área reservada (implementações futuras). Cada ONU poderá receber até 2 canais E1.

Figura 40: Fragmento GEM e Quaro FE1oGEM

Tabela 5: Descrição do Fragmento GEM e Quadro FE1oGEM

Fragmento GEM		
Nome	Comprimento	Função
Port-ID	12 bits	Identifica o terminal de usuário (ONT).
Res	4 bits	Bits reservados. Podem assumir qualquer valor.
Payload	5 a 37 Bytes	Carregar o quadro FE1oGEM.

Quadro FE1oGEM

Nome	Comprimento	função
SYNC	1 Byte	Contém palavra de sincronismo. O terminal de usuário usará o SYNC para achar o sincronismo.
CTRL	3 Bytes	Controle sobre o canal E1.n. Contém 3 Bytes, 2 para indicar qual a quantidade de bits o canal E1.n possui (de1 até 32 Bytes) e 6 bits para indicar qual dos 63 canais E1 o canal E1.n está transportando.
Canal E1.n	1 a 33 Bytes	Contém dados de 1 dos 63 canais E1.
Res	4 bits	Bits reservados. Podem assumir qualquer valor.

Figura 41: FPGA – Downstream (Parte2)

O fragmento GEM deverá ter até 512 Bytes (4096 Bits) e são orientados a Byte (MSB (Most Significant Bit) Primeiro).

4.2.1.3.1. IPcore FE1oGEM – *Downstream* OLT

A interface GEM de entrada do chip GPON-OLT (saída da FPGA da OLT) possui 4 sinais:

GEM_SYNC: Este clock deverá gerar os fragmentos GEM a cada 125 μ s. Este é derivado do backbone TDM e é de 155,520 Mhz

GEM_RX_DATA: Sinal de entrada dos dados seriais, que deverá possuir o estilo do fragmento GEM mostrado na Figura 42.

GEM_RX_VALID: Este sinal deverá ir para o valor máximo assim que se iniciar a transmissão do fragmento GEM e permanecerá assim enquanto houver informação e então, vai para o valor mínimo.

GEM_RX_CLOCK: O Clock é de 155,520 Mb/s.

Figura 42: Sinal de entrada GEM do Chip GPON-OLT

A implementação (IPcore FE1oGEM) mapeará os canais E1 (até 128) providos pelo Demux SDH e os entregará ao chip GPON-OLT, seguindo as regras enviadas pelo processador da OLT (Port-ID, quantidade de E1 para cada ONU, qual dos canais (E1) será transportado. A seguir, o IPcore irá gerar os fragmentos GEM a cada 125 μ s (a cada 125 μ s, o

FE1oGEM deve gerar até 128 fragmentos a uma taxa de 155,520 Mb/s para o chip GPON-OLT).

4.2.1.3.2. IPcore FE1oGEM – *Upstream* OLT

O IPcore do lado do chip GPON-ONU deverá gerar quadros FE1oGEM e enviá-lo para o chip GPON-ONU, onde serão adicionados: O Port-ID (referente à ONU) e área reservada (Res) formando o fragmento GEM que será enviado ao chip GPON-OLT. O chip GPON-OLT recebe essas informações (de todas as ONUs presentes no sistema) e as envia para o IPcore FE1oGEM, onde serão removidos os respectivos Port-ID e Res presentes na informação. Em seguida, é extraído dos canais E1 (até 63 canais) e entregue a uma taxa de 2,048 Mb/s +/- 50ppm por canal.

4.2.1.3.3. IPcore FE1oGEM – *Downstream* ONU

Esta fase será composta por duas etapas: a de extração do(s) canal(is) E1 presente(s) nos quadros FE1oGEM e o fracionamento deste(s) canal(is).

O chip GPON-ONU recebe as informações enviadas pelo chip GPON-OLT, com seu respectivo Port-ID e Res. Este, por sua vez, é extraído pelo chip GPON-ONU, que entrega apenas o quadro GEM ao IPcore FE1oGEM a uma taxa de 19,44 Mhz. Os bits são orientados a Byte, MSB primeiro.

Figura 43: Sinal de saída GEM do Chip GPON-ONU

Os quadros FE1oGEM deverão ser interpretados pela implementação, extraindo os canais E1 (até 2 canais por ONU) e entregá-los às duas interfaces de linha (LIU) existentes em cada ONU.

Os canais serão desmembrados em tributários ($N \times 64\text{Kb/s}$) que deverão ser alocados seguindo a “tabela de alocação de *time slots*” presente em todas as ONU e as tabelas podem ser distintas entre si (Esta tabela define qual dos *time slots* deverá ir para a LIU1 e LIU2). O Passo seguinte é de alocação das informações (*time slots*) em suas devidas posições temporais (com referência ao canal E1, que possui 32 *time slots*), fazendo uso de um comutador temporal, e as demais posições deverão ser preenchidas com bits de enchimento, conforme ilustra da Figura 44. Os *time slots* 0 (alinhamento) e 16 (sinalização CAS) serão utilizados para estes fins, não podendo ser ocupados por tráfego de voz.

Figura 44: Mapeamento dos *time slots* em suas respectivas LIUs

4.2.1.3.4. IPcore FE1oGEM – *Upstream* ONU

Nesta etapa, as interfaces de linha irão entregar os canais E1 de forma fracionada. O IPcore FE1oGEM da ONU deverá ser capaz de mapear os canais com informação e armazená-lo em uma memória de dados (comutador temporal) após um atraso de no máximo 125 μ s. Em seguida, esta memória é entregue novamente ao IPcore FE1oGEM que deverá ser capaz de interpretá-lo a fim de gerar o quadro FE1oGEM. Esta etapa é semelhante à de *dowstream*, apenas deverá ser implementada de forma inversa.

Figura 45: Desmapeamento dos *time slots* em suas respectivas LIUs

4.3. Clock GPON

O Clock GPON será derivado do clock backbone TDM a partir do Demux SDH presente na FPGA da OLT. Toda a cadeia de transporte FE1oGEM deverá ser referenciada a este clock a fim de manter o sincronismo exigido pela hierarquia SDH. A Figura 46 ilustra este processo.

Figura 46: Fonte de Clock GPON

CAPÍTULO 5

PROPOSTA DE PROJETO, IMPLEMENTAÇÃO, SIMULAÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS.

Este capítulo apresenta uma proposta de implementação para transporte de canais E1 (estruturado/canalizado) em redes GPON típicas. Nesta etapa, será desenvolvida, em código HDL (*Hardware Description Language*), que descreverá através de um programa, o comportamento de um circuito lógico a ser introduzida na FPGA (*Field Programmable Gate Array*) da OLT e ONU, com alguns elementos que serão responsáveis por descrever as funcionalidades destes equipamentos e outros, responsáveis pela geração estímulos para a simulação (*testebench*), de modo a introduzir uma nova funcionalidade nos equipamentos GPON. Em geral, o fracionamento de canais E1 é realizado através da técnica CES (*circuit emulation service*) e a proposta descrita a seguir apresenta uma alternativa inovadora para a função de fracionamento, utilizando o TDM Nativo Estruturado, com o objetivo de obter uma granularidade maior dos canais E1.

5. PROJETO GPON

5.1. Visão geral

Tipicamente, no tráfego SDH em redes GPON (Figura 47), cada canal E1, proveniente do STM-1, deverá ser entregue a apenas uma ONU. Não há, desse modo, possibilidade de se atender a todas as ONUs disponíveis no sistema, caso o limite da arquitetura GPON seja estabelecido (128 ONUs por chip GPON-OLT), já que o STM-1 possui apenas 63 canais E1 e cada ONU possui duas saídas de linha E1.

Figura 47: Tráfego SDH em redes GPON

Com o objetivo de obter uma granularidade maior dos canais E1, a nova proposta de tráfego TDM em redes GPON vislumbra uma ampla possibilidade de fragmentação, de montagem e de desmontagem de quadros E1 a fim de se atender a uma maior quantidade de interfaces de linha, presentes nas ONUs.

Esta proposta que será apresentada segue as exigências técnicas e padrões internacionais (no caso do GPON, as normas do ITU-T G.984) bem como as necessidades do desenvolvimento de uma solução em HDL do IPcore FE1oGEM, que proverá a fragmentação do E1 em níveis de DS0 (canais de 64 Kb/s).

5.1.1. Nova proposta GPON – *Downstream*

A ideia de fragmentação do canal E1 pode ser definida da seguinte forma: Como proposto inicialmente, os dados do tráfego STM-1 devem ser desmembrados para a formação dos 63 quadros E1. O passo seguinte (ausente na formulação inicial) seria a comutação temporal e/ou espacial dos *time slots* do quadro E1 e sua fragmentação em E1's fracionados, compostos de $N \times 64$ kb/s cada, com $1 \leq N \leq 32$ (o quadro E1 é composto por 32 canais de 64 kb/s, sendo 30 deles destinados a voz, um a sinalização (CAS) e um a alinhamento). Este procedimento (fracionamento do quadro E1) tornaria a distribuição dos troncos E1 mais

eficiente. As próximas etapas (inserção de Port-ID, área reservada, transporte na rede sobre a forma TDMoGEM), seguiriam (em parte) a proposta inicial.

Após ser retirado o *overhead* (Port-ID e área Reservada (Res)) no terminal do usuário (ONU), os subquadros continuariam a ser desmembrados, a fim de atender as duas interfaces de linha presentes no equipamento. Neste passo, haverá a possibilidade de alocar os canais de voz em *time slots* de forma pré-estabelecida. (Ex: Suponhamos que o subquadro E1 transportado à ONU 1 fosse composto pelos primeiros canais de um determinado quadro E1 (Canal 1 ao canal 15). Ao chegar à ONU e, após retirada do *overhead*, o subquadro poderia ser fragmentado, havendo a possibilidade (com uso de *buffer*) de alocação dos *time slots* em quaisquer canais do novo quadro E1 pré-determinadas pela gerência da ONU). O processo de desmembramento e fragmentação, montagem e desmontagem do quadro E1 estão presentes na norma ITU-T G.704.

A Figura 48 descreve as etapas do tráfego *downstream* dos subquadros E1 na rede GPON, como descrito no parágrafo anterior. Neste exemplo, o quadro E1 será dividido em 2 subquadros de tamanhos idênticos ($E1 = E1/2 + E1/2$), sem comutação temporal e/ou espacial.

Figura 48: Nova proposta de tráfego *downstream* em redes GPON

5.1.2. Nova proposta GPON – *Upstream*

No *upstream*, a origem dos dados são as interfaces de linha (até duas por ONU) presentes nos terminais dos usuários. Os quadros E1 recebidos desta interface possuem bis de enchimento (ITU-T G704) para a formação do quadro. A Gerência da ONU deve saber quais os *time slots* que devem ser extraídos a fim de transportá-los até a OLT. Após a extração dos canais úteis, os dados são reagrupados e formam novamente o subquadro E1, recebem da ONU seu respectivo *overhead* e são colocados à disposição do Chip GPON ONU (deve-se ater ao fato de que, com o fracionamento do E1, é exigido uma quantidade de informações (Port-ID e área reservada) maior para o transporte dos dados). Ao chegar a OLT, a FPGA remove o *overhead* do quadro FE1oGEM. Em seguida, conforme os dados presentes em uma tabela da gerência da OLT, os canais de voz são rearranjados para formarem novamente o quadro E1 de onde se originaram.

Estes processos necessitam de implementações em HDL, na FPGA da OLT e ONU. As tabelas de estruturação da montagem e desmontagem dos troncos E1 devem ser gerenciadas via OMCI. A Figura 49 ilustra este processo de *upstream*.

Figura 49: Nova proposta de tráfego *upstream* em redes GPON

5.2. Implementação

Nesta fase, descreveremos as etapas para implementação (em código HDL) nas FPGAs da OLT e ONU. É importante mencionar que a proposta implementada (nesta etapa e na seguinte) é uma prova de conceito apenas para efeito de simulação, com base nas normas do GPON.

A ideia é destinar dois canais E1, a partir da OLT, comutá-los no tempo e espaço, e entregá-los de forma fracionada (*Fractional* E1 ou FE1) a apenas uma ONU, sendo essa, composta por duas saídas de linha (LIU), conforme ilustra a Figura 50. Para efeito de simplificação da implementação, adotamos as entradas também como sendo de forma fracionada.

Figura 50: Proposta para implementação.

5.2.1. Downstream

5.2.1.1. OLT

A descida dos dados é controlada por dois blocos, que serão chamados de Bloco 1 (referente à OLT) e Bloco 2 (referente à ONU). Neste modelo, eles serão capazes de comutar os *time slots* de forma temporal e espacial, inserir e extrair cabeçalho (Port-ID, Res, SYNC e CTRL - Res, quantidade de bytes referentes ao canal E1 transportado e a indicação de qual canal E1 está sendo transportado) referente à ONU (*downstream*). A Figura 51 apresenta o Bloco 1, referente ao *downstream* da OLT.

Figura 51: OLT - Bloco 1 (*Downstream*).

No Bloco 1 ocorre apenas uma etapa. Cada passo dentro deste bloco será capaz de alterar a estrutura dos canais E1 temporal ou espacialmente, além da inserção de cabeçalho (OH_in) referente à ONU (*downstream*).

A Figura 52 ilustra o bloco de descida, capaz de combinar os *time slots* a serem utilizados em canais E1 (comutação espacial) e, ao mesmo tempo, comutá-los também no tempo (comutação temporal), caso seja necessário. Notar que, nesta etapa, os *time slots* entrantes serão alocados em uma memória de dados e, conforme a ordenação da memória de controle, os dados serão escritos na saída (comutação temporal e espacial).

A saída do bloco OLT de *downstream* constará de informações lidas a partir de *time slots* (entrantes), que serão alocados de forma crescente (com início no primeiro até o último dado inserido) ao *stream*. Os campos sem informação serão agrupados de forma ordenada (de acordo com a memória de controle) após a alocação dos *time slots* com informação.

Os passos descritos acima acontecem simultaneamente e utilizam apenas uma memória de controle e uma memória de dados (por OLT ou ONU), conforme mostrado na Figura 52.

Figura 52: Comutação Temporal e Espacial, seguida da inserção de cabeçalho de OLT (*Downstream*).

Este processo (de comutação temporal e espacial de *time slots* de 1 byte) já é conhecido e tem por base a implementação “IPcore para comutação temporal e espacial” obtida através de um código fonte aberto (*open core*) [41].

5.2.1.2. ONU

A Figura 53 ilustra o Bloco 2 da ONU no sentido *downstream*. Aqui, os dados recebidos serão entregues a uma taxa de 2,048 Mb/s.

Figura 53: ONU - Bloco 2 (*Downstream*).

Nesta etapa acontecerá o inverso do que aconteceu na etapa anterior: Após a remoção do *overhead* (OH_out) referente a esta ONU, os *time slots* serão recombinaados através de comutação temporal e espacial para duas saídas distintas de FE1, seguindo-se o mapeamento da memória de controle, a fim de atender as duas saídas de linha deste equipamento (LIUs).

Notar que, como ocorrido na OLT, os *time slots* entrantes serão alocados em uma memória de dados e, conforme a ordem da entrada da memória de controle (que estarão inseridos na ONU), os dados serão escritos na saída (comutação temporal e espacial). Na saída do Bloco (2) da ONU (*downstream*), os dados seguirão a orientação da memória (de controle), sendo alocados nos dois canais FE1 existentes no bloco.

Os passos descritos acima acontecem simultaneamente, utilizando-se apenas uma memória de controle e uma memória de dados, conforme indicado na Figura 54.

Figura 54: Remoção de cabeçalho, comutação temporal e espacial da ONU (*Downstream*).

5.2.2. Upstream

5.2.2.1. ONU

No sentido *upstream*, o transporte do tráfego E1 se dará de forma inversa ao de *downstream*, sendo necessárias algumas alterações nas etapas deste processo. A Figura 55 apresenta o bloco da ONU na estrutura de *upstream*. Notar que, neste sentido, a comutação espacial e a comutação temporal sofrem alteração na sua alocação, se comparadas ao *downstream*. Tais comutações (temporal e espacial) ocorrerão simultaneamente, como ilustrado na Figura 56. Neste caso, os *time slots* em uso serão comutados no espaço e no tempo, a fim de alocar os *time slots* de forma sequenciada e ordenada, de acordo com a memória de controle.

Figura 55: ONU - Bloco 2 (*upstream*).

Ocorrerá também, nesta etapa, o processo de inserção do cabeçalho (Port-ID, Res, SYNC e CTRL - Res, quantidade de bytes referentes ao canal E1 transportado e a indicação de qual canal E1 está sendo transportado) referente à ONU (*upstream*). A saída do bloco ONU de *upstream* contará de informações lidas a partir de *time slots* (entrantes), que serão alocados de forma crescente ao *stream*. Os campos sem informação serão agrupados de forma ordenada (memória de controle) após a alocação dos *time slots* com informação.

Figura 56: Comutação Temporal e Espacial, seguida da inserção de cabeçalho da ONU (*upstream*).

Este processo também foi baseado numa implementação existente (IPcore para comutação temporal e espacial), obtido através de um código fonte aberto (*open core*) [41].

5.2.2.2. OLT

Nesta etapa, os dados trafegarão sobre o Bloco 1 (OLT), porém acontecerá o inverso do que aconteceu na etapa anterior: Logo após a remoção do *overhead* (OH_out), inserida pela ONU, os *time slots* serão recombinaados, seguindo o mapeamento da memória de controle, para duas saídas, uma que representará o canal E1 com informação e outra, para representar o canal E1 sem informação (através de comutação temporal e espacial), remontando a mesma estrutura que foi inserida na OLT no sentido de *downstream*.

Figura 57: ONU - Bloco 1 (*upstream*).

Como ocorrido na OLT (*downstream*), os *time slots* entrantes serão alocados em uma memória de dados, e conforme a ordem da entrada da memória de controle (que estarão inseridos na OLT), os dados serão escritos na saída (comutação temporal e espacial). Na saída do Bloco OLT de *upstream*, os dados seguirão a orientação da memória (de controle), sendo alocados nos dois canais E1 existentes no bloco, como ilustrado na Figura 57.

Os passos descritos acima acontecem simultaneamente, utilizando apenas uma memória de controle e uma memória de dados (Figura 58).

Figura 58: Remoção de cabeçalho, Comutação Temporal e Espacial da OLT (*upstream*).

5.3. Simulação

5.3.1. Downstream

Inicialmente serão apresentados os resultados obtidos, através de um simulador HDL, para *downstream* e, em seguida, *upstream*. A OLT e ONU serão condensadas em um único sistema para facilitar a integração de cada sentido do transporte de dados (*downstream* e *upstream*), resultando na elaboração de um único *tesbench*, escrito em HDL, onde serão gerados os sinais (*clock*, *reset*, sincronismo) e artifícios para leituras dos arquivos (*streams* e *overheads*) para validação dos blocos da OLT e ONU, também descritos em HDL. A Figura 59 ilustra a organização dos blocos para *downstream*.

Figura 59: Fluxograma (*downstream*)

5.3.1.1. OLT

O *testbench* (que é um ambiente virtual utilizado para verificar a funcionalidade de um dispositivo criado em HDL, através da geração de sinais e estímulos.) da OLT recebe informações de quatro arquivos distintos. O primeiro contém as informações de *overhead*, para identificação da ONU (representadas em um canal E1 de 32 canais, sendo que apenas seis deles apresentarão informações úteis). O segundo é responsável por transportar um canal E1 para deslocamento de informações (neste caso, um E1 com 32 canais sendo utilizados). O terceiro transporta um canal E1 também com 32 canais (mas neste caso, nenhum desses 32 canais conterá informação). O quarto contém as informações sobre o mapa da memória de controle, responsável pela comutação temporal e espacial dos *time slots*.

Inicialmente serão descritas as funções do *testbench* da OLT a partir dos arquivos lidos (*overhead*, canal E1.1 (com informações), canal E1.2 (sem informações) e mapa da memória de controle). Em seguida, os dados obtidos através dos 3 primeiros arquivos descritos são serializados, a fim de tornar o sistema mais compatível com o cenário real, pois os dados provenientes de um STM-1 ou apenas um canal E1 são seriais. Depois disso, os dados são inseridos na OLT, havendo aí uma paralelização dos mesmos (canal E1.1, canal E1.2 e *overhead*) com a finalidade de inseri-los na memória de dados, que, por sua vez, é composta de 8 entradas de canais E1 (paralela), não sendo necessária a utilização de todas (neste caso, serão utilizadas apenas três). Já o mapa da memória segue, sem alteração, para a memória de controle contida também na OLT. A memória de dados acessa a memória de controle e, em concordância com seu mapa, define a saída desta (comutação temporal e espacial). Esses dados são novamente serializados (para simular o *downstream* para a ONU). A partir deste ponto, o *testbench* da OLT lê essas informações e as entrega para o *testbench* da ONU. Em seguida, os dados são paralelizados e geram um arquivo com o resultado da comutação ocorrida na OLT. A Figura 60 apresenta essas etapas.

Figura 60: Simulação OLT (*downstream*)

5.3.1.2. ONU

Na ONU os dados (serializados) são recebidos pelo módulo do *testbench* da ONU e, sem sofrer alterações (sistema ideal), são entregues para o bloco da ONU. O *testbench* também lê um arquivo contendo o mapa da memória de controle, que será entregue à ONU. No bloco da ONU, as informações obtidas na interface da OLT são paralelizadas (em três troncos E1) e entregues à memória de dados. Esta acessa a memória de controle, gerando saídas conforme o mapa ali contido. Em seguida, essas informações são entregues ao *testbench* da ONU para ser gerado um novo arquivo com esses dados. As informações obtidas são relacionadas às duas interfaces de saída E1 da ONU (neste caso, dois canais FE1) e o outro canal contém as informações extraídas pela ONU (*overhead*). A Figura 61 ilustra os passos descritos acima.

Figura 61: Simulação OLT (*downstream*)

5.3.2. Upstream

Neste tópico são descritas as características apresentadas pela simulação, para transmissão no sentido *upstream*. A OLT e ONU serão condensadas em um único sistema (como ocorrido no *downstream*) para facilitar a integração de cada sentido do transporte de dados (*downstream* e *upstream*), resultando na elaboração de um único *tesbench*. A Figura 62 ilustra a organização dos blocos para *upstream*.

Figura 62: Fluxograma (*upstream*)

5.3.2.1. ONU

O *testbench* da ONU, assim como a OLT no *downstream*, também recebe informações de quatro arquivos distintos. O primeiro contém as informações de *overhead*, para identificação da ONU (representadas em um canal E1 de 32 canais, sendo que apenas seis deles apresentarão informações úteis). O segundo é responsável por transportar um canal FE1 (*Fractional E1*) para transmissão de informações (neste caso, um FE1 com 32 canais, sendo utilizados apenas os 20 iniciais). O terceiro transporta um canal FE1 também de 32 canais (neste caso, um FE1 com 32 canais, sendo utilizados apenas os 12 iniciais). O quarto contém as informações sobre o mapa da memória de controle, responsável pela comutação temporal e espacial dos *time slots*. Inicialmente serão descritas as funções do *testbench* da ONU (*upstream*).

A partir dos arquivos lidos (*overhead*, canal FE1.1 (20 canais com informação), canal FE1.2 (12 canais com informação) e mapa da memória de controle) os dados são inseridos na memória de dados (neste caso, são três troncos E1 serializados). O mapa de controle segue, sem alteração estrutural, para sua memória designada na ONU. A memória de dados acessa a memória de controle, e, em concordância com seu mapa, define a saída desta (comutação temporal e espacial). A Figura 63 ilustra essas etapas.

Em seguida às etapas já apresentadas, os dados são serializados. A partir deste ponto, o *testbench* da ONU lê essas informações e as entrega para o *testbench* da OLT. Ao mesmo tempo, os dados são paralelizados e geram um arquivo com o resultado da comutação ocorrida na ONU.

Figura 63: Simulação ONU (*upstream*)

5.3.2.2. OLT

Na OLT, os dados serializados são recebidos pelo módulo do *testbench* da OLT oriundos da ONU, sem que tenham sofrido qualquer alteração (considera-se um sistema ideal). O *testbench* também lê um arquivo contendo um mapa da memória de controle, que será entregue para a OLT. No bloco da OLT, as informações obtidas na interface do *testbench* da ONU são paralelizadas e entregues à memória de dados. A memória de dados acessa a memória de controle, gerando saídas conforme o mapa. Logo em seguida, essas informações são entregues ao *testbench* da OLT, a fim de ser gerado um novo arquivo, que contém as informações de saída da memória de dados, conforme mostrado na Figura 64.

Figura 64: Simulação OLT (*upstream*)

As informações obtidas são relacionadas aos dois canais E1 inseridos no *downstream* (neste caso, um canal E1 com 32 *time slots* sendo utilizados e outro, com 32 *time slots* vazios) e o outro canal contém as informações da ONU (*overhead*).

5.4. Resultados da Simulação

5.4.1. *Downstream*

Como resultado das simulações no sentido *downstream*, serão apresentadas as formas de onda geradas em um simulador de HDL. A Figura 65 apresenta as formas de onda geradas para o bloco de descida (*downstream*). Para isso, foram gerados sete arquivos em HDL (*downstream*), conforme Tabela 6. Os sinais apresentados na Figura 65 estão descritos na Tabela 7.

Figura 65: *Downstream*

Tabela 6: Descrição dos arquivos de *downstream*.

Arquivo	Descrição
OLT_ONU_testbench.v	Arquivo gerador de estímulos para os da OLT e ONU
OLT_top.v	Arquivo que descreve as funcionalidades da OLT
OLT_RAM_dados.v	Arquivo responsável pela comutação espacial e temporal da OLT.
OLT_RAM_controle.v	Arquivo responsável pelo controle da memória de dados. Sua fonte será lida a partir de um arquivo txt, na OLT.
ONU_top.v	Arquivo que descreve as funcionalidades da ONU
ONU_RAM_dados.v	Arquivo responsável pela comutação espacial e temporal da ONU.
ONU_RAM_controle.v	Arquivo responsável pelo controle da memória de dados. Sua fonte será lida a partir de um arquivo txt, na ONU.

5.4.1.1. OLT

A Figura 66 ilustra a entrada dos dados, na OLT, no sentido *downstream*. O *Stream 1* (*in_stream_olt_0*) representa o primeiro canal E1 (tronco com tamanho de 32 bytes – cada *time slot* tem o tamanho de 1 byte – e com 32 deles contendo informação – neste caso, são valores em hexadecimal, de 00 até 1F – como pode ser visto na Tabela 8: *Stream 1*) inserido na OLT. O *Stream 2* (*in_stream_olt_1*) representa o segundo canal E1 inserido na OLT (tronco com tamanho de 32 bytes – cada *time slot* tem o tamanho de 1 byte – e com 32 deles não contendo informação – neste caso, são valores em hexadecimal, todos de 00 – como ilustrado na Tabela 8: *Stream 2*). O *Overhead* (*in_stream_olt_oh*) representa os 6 *time slots*, de um canal E1, que serão utilizados para identificação da ONU destinatária dos troncos E1 (tronco com tamanho de 32 bytes – cada *time slot* tem o tamanho de 1 byte – e com 32 deles contendo informação – neste caso, são valores em hexadecimal, os seis primeiros com o valor de FF e os outros vinte e seis com valores de AA – para distinguir os *time slots* que serão utilizados daqueles que não terão uso – conforme Tabela 8: *overhead*). Após a passagem desses dados pela OLT, onde ocorrerá a comutação temporal e espacial, os dados sairão conforme mostrado na Figura 67. A Tabela 7 apresenta a descrição dos sinais apresentados nas imagens de formas de onda que seguem.

Tabela 7: Descrição dos sinais

Sinal	Descrição
frame_8k	Quadro de 8Khz (125µs)
time_slot_olt	<i>Time Slot</i> (1 byte) gerado para a OLT
time_slot_onu	<i>Time Slot</i> (1 byte) gerado para a ONU
display_en_olt	Contador para formar o quadro de 32 bytes da OLT
display_en_onu	Contador para formar o quadro de 32 bytes da ONU
FS_SIG_OLT	Sinal de sincronismo do quadro de 32 bytes da OLT
FS_SIG_ONU	Sinal de sincronismo do quadro de 32 bytes da ONU
in_stream_olt_0	<i>Stream</i> de dados de entrada na OLT referente ao <i>stream 1</i>
in_stream_olt_1	<i>Stream</i> de dados de entrada na OLT referente ao <i>stream 2</i>
in_stream_olt_oh	<i>Stream</i> de dados de entrada na OLT referente ao <i>overhead</i>
MEMORY_OLT	Dados da memória de controle da OLT
MEMORY_ONU	Dados da memória de controle da OONU
out_stream_olt_0	<i>Stream</i> de dados de saída na OLT (<i>stream 1</i>)
out_stream_olt_1	<i>Stream</i> de dados de saída na OLT (<i>stream 2</i>)
out_stream_olt_7	<i>Stream</i> de dados de saída na OLT (<i>overhead</i>)
out_stream_onu_0	<i>Stream</i> de dados de entrada na ONU (<i>stream 1</i> - equivalente ao out_stream_olt_0)
out_stream_onu_1	<i>Stream</i> de dados de entrada na ONU (<i>stream 2</i> - equivalente ao out_stream_olt_1)
out_stream_onu_7	<i>Stream</i> de dados de entrada na ONU (<i>overhead</i> - equivalente ao out_stream_olt_7)
reset_olt	Inicia os trabalhos na OLT
reset_onu	Inicia os trabalhos na ONU
slot_load_olt	Sinal de sincronismo dos <i>time slots</i> da OLT
slot_load_onu	Sinal de sincronismo dos <i>time slots</i> da ONU

Figura 66: Downstream OLT (Entrada).

Figura 67: Downstream OLT (Saída).

As Tabelas 8 e 9 apresentam os dados provenientes dos arquivos de leitura (*stream 1*, *stream 2* e *overhead*) e escrita (resultado da simulação da OLT) do *testbench* da OLT, respectivamente.

Tabela 8: Entrada dados na OLT (*downstream*)

Entrada da OLT				
<pre> ===== ***** SWITCHING ***** ***** RESULT ***** ***** - OLT_IN - ***** ===== </pre>				
Time Slot	#	STREAM_0	STREAM_1	OVERHEAD
Time Slot 0	0	00	00	ff
Time Slot 1	1	01	00	ff
Time Slot 2	2	02	00	ff
Time Slot 3	3	03	00	ff
Time Slot 4	4	04	00	ff
Time Slot 5	5	05	00	ff
Time Slot 6	6	06	00	aa
Time Slot 7	7	07	00	aa
Time Slot 8	8	08	00	aa
Time Slot 9	9	09	00	aa
Time Slot 10	10	0a	00	aa
Time Slot 11	11	0b	00	aa
Time Slot 12	12	0c	00	aa
Time Slot 13	13	0d	00	aa
Time Slot 14	14	0e	00	aa
Time Slot 15	15	0f	00	aa
Time Slot 16	16	10	00	aa
Time Slot 17	17	11	00	aa
Time Slot 18	18	12	00	aa
Time Slot 19	19	13	00	aa
Time Slot 20	20	14	00	aa
Time Slot 21	21	15	00	aa
Time Slot 22	22	16	00	aa
Time Slot 23	23	17	00	aa
Time Slot 24	24	18	00	aa
Time Slot 25	25	19	00	aa
Time Slot 26	26	1a	00	aa
Time Slot 27	27	1b	00	aa
Time Slot 28	28	1c	00	aa
Time Slot 29	29	1d	00	aa
Time Slot 30	30	1e	00	aa
Time Slot 31	31	1f	00	aa

Tabela 9: Saída dados na OLT (*downstream*)

Saída da OLT				
***** SWITCHING *****				
***** RESULT *****				
***** - OLT_OUT - *****				
Time Slot	#	STREAM_0	STREAM_1	OVERHEAD
Time Slot 0		ff	1a	00
Time Slot 1		ff	1b	00
Time Slot 2		ff	1c	00
Time Slot 3		ff	1d	00
Time Slot 4		ff	1e	00
Time Slot 5		ff	1f	00
Time Slot 6		00	00	aa
Time Slot 7		01	00	aa
Time Slot 8		02	00	aa
Time Slot 9		03	00	aa
Time Slot 10		04	00	aa
Time Slot 11		05	00	aa
Time Slot 12		06	00	aa
Time Slot 13		07	00	aa
Time Slot 14		08	00	aa
Time Slot 15		09	00	aa
Time Slot 16		0a	00	aa
Time Slot 17		0b	00	aa
Time Slot 18		0c	00	aa
Time Slot 19		0d	00	aa
Time Slot 20		0e	00	aa
Time Slot 21		0f	00	aa
Time Slot 22		10	00	aa
Time Slot 23		11	00	aa
Time Slot 24		12	00	aa
Time Slot 25		13	00	aa
Time Slot 26		14	00	aa
Time Slot 27		15	00	aa
Time Slot 28		16	00	aa
Time Slot 29		17	00	aa
Time Slot 30		18	00	aa
Time Slot 31		19	00	aa

Cada *time slot* é formado por dois valores em hexadecimal (1 byte). Esses valores são agrupados e cada uma das colunas (*STREAM 0*, *STREAM 1* e *OVERHEAD*) formam os *streams* de entrada na OLT.

5.4.1.2. ONU

Por se tratar de um sistema ideal (sem perdas), é possível representar a entrada da ONU como sendo a mesma da saída de OLT. O Sinal *out_stream_olt_0* representa *stream 1*, *out_stream_olt_1* representa o *stream 2* e o sinal *in_stream_olt_7* representa o *stream* de *overhead*. Deste modo, a Figura 67 ilustra a entrada dos dados da ONU, no sentido de *downstream*.

Após os dados percorrerem a ONU, onde ocorrerão as comutações temporal e espacial, a saída se dará conforme apresenta a Figura 68.

O *Stream 1-FE1* representa o primeiro canal FE1 (com 20, dos 32 canais sendo utilizados) que será destinado à primeira saída de linha da ONU. O *Stream 2-FE1* representa o segundo canal FE1 (com 12, dos 32 canais sendo utilizados) que será destinado à segunda saída de linha da ONU. Depois de serem removidos os dados de *overhead* referente a esta ONU, ele é remontado, conforme foi inserido na OLT, no sentido de *downstream*.

É possível perceber que os dados foram entregues de forma semelhante à estabelecida inicialmente, conforme Tabelas 10 e 11. Os resultados obtidos através de simulações destoam do ambiente real por ausência de fatores externos de perturbação que ocorrem em situações corriqueiras de transmissão digital, neste caso, o transporte de canais E1, dentre eles o Jitter, Wander, sincronismo, etc. Esses efeitos não foram abordados ou tratados por não fazerem parte do escopo do trabalho, que se propõe a ser uma prova de conceito.

Algum atraso pode ocorrer caso sejam utilizados os 63 canais E1 do STM-1 (tanto no *downstream* quanto no *upstream*), pois, para que aconteça a comutação temporal e espacial (ocorrida na memória de dados), os dados precisam ser armazenados (em *buffer*) na memória de dados e só após este armazenamento, as informações são então comutadas.

Figura 68: Downstream ONU (Saída).

As Tabelas 10 e 11 apresentam os dados provenientes dos arquivos de leitura (*testbench* da ONU) e escrita (resultado da simulação da ONU) do *testbench* da ONU, respectivamente.

Tabela 10: Entrada de dados na ONU (*downstream*)

Entrada da ONU				
***** SWITCHING *****				
***** RESULT *****				
***** - ONU IN - *****				
Time Slot	#		STREAM_0	STREAM_1
Time Slot 0	0		ff	1a
Time Slot 1	1		ff	1b
Time Slot 2	2		ff	1c
Time Slot 3	3		ff	1d
Time Slot 4	4		ff	1e
Time Slot 5	5		ff	1f
Time Slot 6	6		00	00
Time Slot 7	7		01	00
Time Slot 8	8		02	00
Time Slot 9	9		03	00
Time Slot 10	10		04	00
Time Slot 11	11		05	00
Time Slot 12	12		06	00
Time Slot 13	13		07	00
Time Slot 14	14		08	00
Time Slot 15	15		09	00
Time Slot 16	16		0a	00
Time Slot 17	17		0b	00
Time Slot 18	18		0c	00
Time Slot 19	19		0d	00
Time Slot 20	20		0e	00
Time Slot 21	21		0f	00
Time Slot 22	22		10	00
Time Slot 23	23		11	00
Time Slot 24	24		12	00
Time Slot 25	25		13	00
Time Slot 26	26		14	00
Time Slot 27	27		15	00
Time Slot 28	28		16	00
Time Slot 29	29		17	00
Time Slot 30	30		18	00
Time Slot 31	31		19	00

Tabela 11: Saída de dados na ONU (*downstream*)

Saída da ONU				
***** SWITCHING *****				
***** RESULT *****				
***** - ONU OUT - *****				
Time Slot	#	STREAM_0	STREAM_1	OVERHEAD
Time Slot 0	0	00	14	ff
Time Slot 1	1	01	15	ff
Time Slot 2	2	02	16	ff
Time Slot 3	3	03	17	ff
Time Slot 4	4	04	18	ff
Time Slot 5	5	05	19	ff
Time Slot 6	6	06	1a	aa
Time Slot 7	7	07	1b	aa
Time Slot 8	8	08	1c	aa
Time Slot 9	9	09	1d	aa
Time Slot 10	10	0a	1e	aa
Time Slot 11	11	0b	1f	aa
Time Slot 12	12	0c	00	aa
Time Slot 13	13	0d	00	aa
Time Slot 14	14	0e	00	aa
Time Slot 15	15	0f	00	aa
Time Slot 16	16	10	00	aa
Time Slot 17	17	11	00	aa
Time Slot 18	18	12	00	aa
Time Slot 19	19	13	00	aa
Time Slot 20	20	00	00	aa
Time Slot 21	21	00	00	aa
Time Slot 22	22	00	00	aa
Time Slot 23	23	00	00	aa
Time Slot 24	24	00	00	aa
Time Slot 25	25	00	00	aa
Time Slot 26	26	00	00	aa
Time Slot 27	27	00	00	aa
Time Slot 28	28	00	00	aa
Time Slot 29	29	00	00	aa
Time Slot 30	30	00	00	aa
Time Slot 31	31	00	00	aa

5.4.2. Upstream

Como resultado das simulações no sentido de *upstream*, serão apresentadas as formas de onda geradas em um simulador de HDL. A Figura 69 apresenta as formas de onda geradas para o bloco de saída (*upstream*). Para isso, foram gerados sete arquivos em HDL (*upstream*), conforme Tabela 12. Os sinais apresentados na Figura 69 estão descritos na Tabela 7.

Tabela 12: Descrição dos arquivos de *upstream*.

Arquivo	Descrição
OLT_ONU_testbench.v	Arquivo gerador de estímulos para os da OLT e ONU
OLT_top.v	Arquivo que descreve as funcionalidades da OLT
OLT_RAM_dados.v	Arquivo responsável pela comutação espacial e temporal da OLT.
OLT_RAM_controle.v	Arquivo responsável pelo controle da memória de dados. Sua fonte será lida a partir de um arquivo txt, na OLT.
ONU_top.v	Arquivo que descreve as funcionalidades da ONU
ONU_RAM_dados.v	Arquivo responsável pela comutação espacial e temporal da ONU.
ONU_RAM_controle.v	Arquivo responsável pelo controle da memória de dados. Sua fonte será lida a partir de um arquivo txt, na ONU.

Figura 69: Upstream

5.4.2.1. ONU

A Figura 70 ilustra a entrada dos dados na ONU, no sentido *upstream*. O *Stream 1* – FE1 representa o primeiro canal E1 (com 20, dos 32 canais sendo utilizados) inserido na primeira LIU da ONU. O *Stream 2* – FE1 representa o segundo canal E1 inserido na OLT (com 12, dos 32 canais sendo utilizados) inserido na primeira LIU da ONU. O *Overhead* representa os 6 *time slots*, de um canal E1, que serão utilizados para identificação da ONU.

Após a passagem desses dados pela OLT, onde ocorrerão as comutações temporal e espacial, os dados sairão da forma que é apresentada na Figura 71.

Figura 70: Upstream ONU (Entrada).

Figura 71: *Upstream* ONU (Saída).

As Tabelas 13 e 14 apresentam os dados provenientes dos arquivos de leitura (*stream* FE1.1, *stream* FE1.2 e *overhead*) e escrita (resultado da simulação da ONU (*upstream*)) do *testbench* da ONU.

Tabela 13: Entrada de dados na ONU (*upstream*)

Entrada da ONU				
***** SWITCHING *****				
***** - ONU IN - *****				
Time Slot	#	STREAM_0	STREAM_1	OVERHEAD
Time Slot 0	0	00	14	ff
Time Slot 1	1	01	15	ff
Time Slot 2	2	02	16	ff
Time Slot 3	3	03	17	ff
Time Slot 4	4	04	18	ff
Time Slot 5	5	05	19	ff
Time Slot 6	6	06	1a	aa
Time Slot 7	7	07	1b	aa
Time Slot 8	8	08	1c	aa
Time Slot 9	9	09	1d	aa
Time Slot 10	10	0a	1e	aa
Time Slot 11	11	0b	1f	aa
Time Slot 12	12	0c	00	aa
Time Slot 13	13	0d	00	aa
Time Slot 14	14	0e	00	aa
Time Slot 15	15	0f	00	aa
Time Slot 16	16	10	00	aa
Time Slot 17	17	11	00	aa
Time Slot 18	18	12	00	aa
Time Slot 19	19	13	00	aa
Time Slot 20	20	00	00	aa
Time Slot 21	21	00	00	aa
Time Slot 22	22	00	00	aa
Time Slot 23	23	00	00	aa
Time Slot 24	24	00	00	aa
Time Slot 25	25	00	00	aa
Time Slot 26	26	00	00	aa
Time Slot 27	27	00	00	aa
Time Slot 28	28	00	00	aa
Time Slot 29	29	00	00	aa
Time Slot 30	30	00	00	aa
Time Slot 31	31	00	00	aa

Tabela 14: Saída de dados na ONU (*upstream*)

Saída da ONU

***** SWITCHING *****				
***** RESULT *****				
***** - ONU_OUT - *****				
Time Slot	#		STREAM_0	STREAM_1 OVERHEAD
Time Slot	0		ff	1a 00
Time Slot	1		ff	1b 00
Time Slot	2		ff	1c 00
Time Slot	3		ff	1d 00
Time Slot	4		ff	1e 00
Time Slot	5		ff	1f 00
Time Slot	6		00	00 aa
Time Slot	7		01	00 aa
Time Slot	8		02	00 aa
Time Slot	9		03	00 aa
Time Slot	10		04	00 aa
Time Slot	11		05	00 aa
Time Slot	12		06	00 aa
Time Slot	13		07	00 aa
Time Slot	14		08	00 aa
Time Slot	15		09	00 aa
Time Slot	16		0a	00 aa
Time Slot	17		0b	00 aa
Time Slot	18		0c	00 aa
Time Slot	19		0d	00 aa
Time Slot	20		0e	00 aa
Time Slot	21		0f	00 aa
Time Slot	22		10	00 aa
Time Slot	23		11	00 aa
Time Slot	24		12	00 aa
Time Slot	25		13	00 aa
Time Slot	26		14	00 aa
Time Slot	27		15	00 aa
Time Slot	28		16	00 aa
Time Slot	29		17	00 aa
Time Slot	30		18	00 aa
Time Slot	31		19	00 aa

5.4.2.2. OLT

Como ocorrido do bloco de descida, aqui a OLT também receberá dados provenientes da ONU de forma inalterada (sistema ideal). Logo, é possível representar a entrada da OLT como sendo a mesma da saída de ONU. O Sinal `out_stream_onu_0` representa *stream 1*, `out_stream_onu_1` representa o *stream 2* e o sinal `in_stream_onu_7` representa o *stream* de *overhead*. Deste modo, a Figura 71 ilustra a entrada dos dados da OLT, no sentido *upstream*.

Após os dados percorrerem a OLT, onde ocorrerão as comutações temporal e espacial, a saída se dará conforme apresenta a Figura 72. O *Stream 1* (`out_stream_olt_0`) representa o primeiro canal E1 – semelhante ao que foi inserido no *downstream* – da OLT (tronco com tamanho de 32 bytes – cada *time slot* tem o tamanho de 1 byte – e com 32 deles contendo informação – neste caso, são valores em hexadecimal, de 00 até). O *Stream 2* (`out_stream_olt_1`) representa o segundo canal E1 inserido na OLT – também semelhante ao que foi inserido no *downstream* – (tronco com tamanho de 32 bytes – cada *time slot* tem o tamanho de 1 byte – e com 32 deles não contendo informação – neste caso, são valores em hexadecimal, todos de 00). O *Overhead* (`out_stream_olt_7`) representa os 6 *time slots*, de um canal E1, que serão utilizados para identificação da ONU destinatária dos troncos E1 – também semelhante ao que foi inserido no *downstream* – (tronco com tamanho de 32 bytes – cada *time slot* tem o tamanho de 1 byte – e com 32 deles contendo informação – neste caso, são valores em hexadecimal, os seis primeiros com o valor de FF e os outros vinte e seis com valores de AA, para distinguir os *time slots* que serão utilizados daqueles que não terão uso).

É possível perceber, também, que os dados foram entregues de forma semelhante à estabelecida inicialmente, conforme Tabelas 15 e 16. Da mesma forma que para a ONU, os resultados obtidos através de simulações são distintos dos ambientes reais pela ausência de fatores externos ou mesmo situações corriqueiras em transmissões digitais, dentre elas o Jitter, Wander, sincronismo, etc.

Figura 72: Upstream OLT (Saída)

As Tabelas 15 e 16 apresentam os dados provenientes dos arquivos de leitura (*testbench* da OLT) e escrita (resultado da simulação da ONU) do *testbench* da ONU, respectivamente.

Tabela 15: Entrada de dados na OLT (*upstream*)

Entrada da OLT				
***** SWITCHING *****				
***** RESULT *****				
***** - OLT IN - *****				
Time Slot	#	STREAM_0	STREAM_1	OVERHEAD
Time Slot 0	0	ff	1a	00
Time Slot 1	1	ff	1b	00
Time Slot 2	2	ff	1c	00
Time Slot 3	3	ff	1d	00
Time Slot 4	4	ff	1e	00
Time Slot 5	5	ff	1f	00
Time Slot 6	6	00	00	aa
Time Slot 7	7	01	00	aa
Time Slot 8	8	02	00	aa
Time Slot 9	9	03	00	aa
Time Slot 10	10	04	00	aa
Time Slot 11	11	05	00	aa
Time Slot 12	12	06	00	aa
Time Slot 13	13	07	00	aa
Time Slot 14	14	08	00	aa
Time Slot 15	15	09	00	aa
Time Slot 16	16	0a	00	aa
Time Slot 17	17	0b	00	aa
Time Slot 18	18	0c	00	aa
Time Slot 19	19	0d	00	aa
Time Slot 20	20	0e	00	aa
Time Slot 21	21	0f	00	aa
Time Slot 22	22	10	00	aa
Time Slot 23	23	11	00	aa
Time Slot 24	24	12	00	aa
Time Slot 25	25	13	00	aa
Time Slot 26	26	14	00	aa
Time Slot 27	27	15	00	aa
Time Slot 28	28	16	00	aa
Time Slot 29	29	17	00	aa
Time Slot 30	30	18	00	aa
Time Slot 31	31	19	00	aa

Tabela 16: Saída de dados na OLT (*upstream*)

Saída da OLT				
***** SWITCHING *****				
***** RESULT *****				
***** - OLT OUT - *****				
Time Slot	#	STREAM_0	STREAM_1	OVERHEAD
Time Slot 0	0	00	00	ff
Time Slot 1	1	01	00	ff
Time Slot 2	2	02	00	ff
Time Slot 3	3	03	00	ff
Time Slot 4	4	04	00	ff
Time Slot 5	5	05	00	ff
Time Slot 6	6	06	00	aa
Time Slot 7	7	07	00	aa
Time Slot 8	8	08	00	aa
Time Slot 9	9	09	00	aa
Time Slot 10	10	0a	00	aa
Time Slot 11	11	0b	00	aa
Time Slot 12	12	0c	00	aa
Time Slot 13	13	0d	00	aa
Time Slot 14	14	0e	00	aa
Time Slot 15	15	0f	00	aa
Time Slot 16	16	10	00	aa
Time Slot 17	17	11	00	aa
Time Slot 18	18	12	00	aa
Time Slot 19	19	13	00	aa
Time Slot 20	20	14	00	aa
Time Slot 21	21	15	00	aa
Time Slot 22	22	16	00	aa
Time Slot 23	23	17	00	aa
Time Slot 24	24	18	00	aa
Time Slot 25	25	19	00	aa
Time Slot 26	26	1a	00	aa
Time Slot 27	27	1b	00	aa
Time Slot 28	28	1c	00	aa
Time Slot 29	29	1d	00	aa
Time Slot 30	30	1e	00	aa
Time Slot 31	31	1f	00	aa

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Este trabalho expôs, de forma ampla, as técnicas de transporte TDM em redes ópticas passivas com capacidade Gigabit (GPON). Conforme apresentado, duas técnicas são utilizadas atualmente: o TDM Nativo e o CES. A escolha pelo TDM nativo (também conhecido como TDM over GEM (TDMoGEM) ou TDM over GPON (TDMoGPON)) deu-se pelo fato de que esta técnica, em comparação com o CES, transporta todo o tráfego levando em consideração toda a estruturação do TDM e não utiliza o tráfego ethernet, gerando assim uma economia de banda. Além do transporte TDM, o trabalho aborda a possibilidade de fragmentação (canalização) do tráfego em nível DS0, possibilitando o fracionamento e comutação (temporal e espacial) do mesmo, com o objetivo de atender uma quantidade maior de ONUs.

A validação aconteceu através de uma implementação que permite, de forma clara e objetiva, transportar TDM nativo de forma estruturada/canalizada. As simulações apresentadas no trabalho demonstram a existência de uma oportunidade de implementação prática para transporte TDM, em uma abordagem distinta da usada atualmente no mercado. É importante salientar que não foram incluídos alguns problemas que geralmente ocorrem em transporte TDM (Jitter, Wander, problemas de sincronismo).

Inicialmente, foi validado o transporte TDM em Redes GPON no sentido *downstream*, demonstrando a condução dos dados desde a entrada na OLT até as duas saídas de linha presentes na ONU do sistema.

Posteriormente, foi proposto um segundo sentido para o transporte dos dados, que foi o de *upstream*. Nesta etapa, duas LIU presentes na ONU recebiam os dados e os entregavam à OLT, que tinha por objetivo destinar seus dados ao tráfego externo.

Como pesquisas futuras, sugere-se a análise dos diversos efeitos físicos que podem ocorrer no tráfego dos dados da OLT até a ONU, bem como alguns efeitos já conhecidos em transporte TDM (Jitter, Wander, problemas de sincronismo).

REFERÊNCIAS

- [1] G. Kramer, *“Ethernet Passive Optical Networks”*, McGraw-Hill, United State of America, 2005.
- [2] T. Koonen, “Fiber to the home/fiber to the premises: What, Where, and When?”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, N° 5, pp. 911-934, 2006.
- [3] C. H. Lee, W. V. Sorin, B. Y. Kim “Fiber to the Home Using a PON Infrastructure”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, N° 12, pp. 4568-4583, 2006.
- [4] P. E. Green, “Fiber to the home: “The Next Big Broadband Thing”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, N° 100-106, 2004
- [5] M. Abrams, P. C. Becker, Y. Fujimoto, V. O’Byrne and D. Piehler. “FTTP Deployments in the United States and Japan-Equipment Choices and Service Provider Imperatives”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 23, N° 1, pp. 236-246, 2005.
- [6] I. Cale, A. Salihovic, M. Ivekovic. “Gigabit Passive Optical Network – GPON”. *29th International Conference on Information Technology Interfaces*, 2007.
- [7] G. Kramer, B. Mukherjee, and G. Pesavento, “Ethernet PON (ePON): Design and Analysis of an Optical Access Network”, *Photonic Network Communications*, Vol. 3, No 3, 2001.
- [8] C. F. Lam. *“Passive Optical Network: Principles and Practice”*, Elsevier Inc, 2007.
- [9] A. Gumaste, T. Antony. *“First Mile Access Networks and Enabling Technologies”*, Cisco Press, 2004
- [10] L. Wosinska and J. C. Chapt. *“Next-Generation FTTH Passive Optical Networks: Research Towards Unlimited Bandwidth Access”* Josep Prat, (Ed.), Springer, 2008.
- [11] G. Keiser. *“FTTX: Concepts and Applications”*, John Wiley & Sons, Inc, 2006
- [12] ITU-T Recommendation G.984.2. “Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON)- Physical Media Dependent (PMD) layer specification”, 2003
- [13] “FTTx PON Guide Testing Passive Optical Networks”. Disponível em <<http://www.exfo.com>>

- [14] R. Horak. "*Telecommunications and Data Communications Handbook*", 2nd Edition, Wiley, 2007.
- [15] ITU-T Recommendation G.984.1. "Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): General Characteristics", 2003
- [16] Y. Luo, S. Yin, N. Ansari, T. Wang. "Resource Management for Broadband Access Over Time-Division Multiplexed Passive Optical Networks", *IEEE Network*, September/October 2007.
- [17] ITU-T Recommendation G.983.1: "Broadband Optical Access Systems Based on Passive Optical Networks (PON)". 2005.
- [18] K. M. Sivalingam, S. Subramaniam. "*Emerging optical network technologies: architectures, protocols, and performance*". New York : Springer, 2005.
- [19] S. Lallukka, P. Raatikainen. "Passive Optical Networks. Transport concepts". Espoo 2006. *VTT Publications 597*, p.123.
- [20] Ethernet for the first mile (EFM). Disponível em <<http://www.ieee802.org/3/efm/>>
- [21] ITU-T Recommendation G.984.3. "Gigabit-capable passive optical networks (GPON): transmission convergence layer specification", 2008.
- [22] ITU-T Recommendation G.984.4. "Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): ONT management and control interface specification", 2004
- [23] C. Lin. "*Broadband Optical Access Networks and Fiber-to-the-Home: Systems Technologies and Deployment Strategies*", Wiley, 2006
- [24] F. G. Moraes, N. L. Calazans, C. Marcon, J. C. S. A. Palma, D. Mesquita, V. Blauth. Design and Prototyping of an E1 Drop_Insert soft core. *IEE Proceedings Communications*, Londres, v.150, n.4, p.239-243, 2003.
- [25] B. Ernhofer, D. Tal. "Enabling TDM Business Services Across GPON Access Networks". *White Paper Zarlink Semiconductor*, 2006.
- [26] "Guide to ATM Technology for the Catalyst 8540 MSR, Catalyst 8510 MSR, and LightStream 1010 ATM Switch Routers". Cisco Systems, Inc, 2000. Disponível em: <http://www.cisco.com/application/pdf/en/us/guest/products/ps726/c2001/ccmigration_09186a00800f61a7.pdf>.

- [27] T. Frost. "Circuit Emulation Provides Viable Alternative to VoIP". Disponível em: <<http://www.commsdesign.com/showArticle.jhtml?articleID=17500765>>.
- [28] T. Lang. "Voice over Packet - It's Time to Look at Circuit Emulation Services". Ecnmag.com , 2004.
- [29] A. Vainshtein, Y. Stein, I. Sasson, A. Sadovski, E. Metz, T. Frost, P. Pate. "Unstructured TDM circuit emulation service over packet switched network (UCESoPSN)". Working Group, 2003.
- [30] J. Aweya, M. Ouellette, D. Y. Montuno, J. Markandu, K. Sundstrom, K. Felske. "Circuit emulation services over ethernet-part 2: prototype and experimental results". *International Journal of Network Management* 14(1): 45-58 (2004).
- [31] D. Bar-Lev, D. Tal. "Enabling TDM business services over GPON". White Paper. *BroadLight & Resolute Networks*, 2006.
- [32] David Brief, Gal Sitton,. "Using circuit emulation to sell TDM over GPONs". Disponível em: <<http://www.networksystemsdesignline.com/howto/166403088>>.
- [33] D. Minoli. "Enterprise Networking: Fractional T1 to SONET, Frame Relay to BISDN". *Artech House*, 1993.
- [34] "Introduction to Circuit Emulation Services over Ethernet", *Metro Ethernet Forum*, 2004 <<http://metroethernetforum.org/pdfs/whitepapers/introduction-to-cesoe.pdf>>.
- [35] J. M. C. Brito. "Voz sobre ATM". Disponível em: <http://www.inforede.net/Technical/Layer_3_and_4/Network_ATM/Paper_CH11_Voz_sobre_ATM.pdf>.
- [36] C. Marcon, J. C. S. A. Palma, N. L. Calazans, F. G. Moraes. Design, Validation and Prototyping of the EMS SDH STM-1 Mapper Soft-core. *Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações*, v.20, p.74-82, 2005.
- [37] P. Giacomazzi, V. Trecordi. "A Study of Non Blocking Multicast Switching Networks". *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 43, N. 2/3/4, 1163-1168, 1995.
- [38] "Comutação Digital por Circuito". Disponível em: <<http://www.df.fee.unicamp.br/~motoyama/ee981/apostilas/Capitulo4.pdf>>. Acesso em: 03 de maio de 2009.

- [39] J. Bellamu. “*Digital Telephony*”, 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- [40] Dispositivo lógico programável (FPGA) e linguagem de descrição de hardware (VHDL). Disponível em <<http://www.ee.pucrs.br/~terroso/fpgavhdl6.pdf>>. Acesso em: 02 de março de 2011
- [41] “Time Slot Interchange Digital Switch”. Disponível em <http://opencores.com/project,tdm_switch>. Acesso em: 10 de maio de 2010