



**Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul**  
**Faculdade de Engenharia – Faculdade de Informática**  
**Curso de Engenharia de Computação**



---

**Desenvolvimento de Módulos de Hardware para  
Extração e Inserção de Carga Útil  
10 Gigabit Ethernet em Quadros OTN**

Proposta de Trabalho de Conclusão

---

**Autores**

Frederico Ferlini  
Jeferson Camargo de Oliveira

**Orientador**

Prof. Dr. Fernando Gehm Moraes

Porto Alegre, agosto de 2008.

# Índice

---

<b>ÍNDICE.....</b>	<b>II</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>III</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>	<b>IV</b>
<b>LISTA DE SIGLAS.....</b>	<b>V</b>
<b>TERMOS E DEFINIÇÕES.....</b>	<b>VII</b>
<b>CONVENÇÕES.....</b>	<b>IX</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 RESULTADOS ESPERADOS.....	2
<b>2 PADRÃO OTN - RECOMENDAÇÃO G.709.....</b>	<b>4</b>
2.1 ESTRUTURA LÓGICA DO PADRÃO OTN G.709.....	5
2.2 QUADRO.....	6
2.3 MULTI-QUADRO.....	6
2.4 ESTRUTURA DO CABEÇALHO.....	7
2.5 FRAME ALIGNMENT OVERHEAD (FA OH).....	8
2.6 OPTICAL CHANNEL TRANSPORT UNIT OVERHEAD (OTU OH).....	10
2.7 OPTICAL CHANNEL DATA UNIT OVERHEAD (ODU OH).....	13
2.8 OPTICAL CHANNEL PAYLOAD UNIT OVERHEAD (OPU OH).....	15
2.9 CARGA ÚTIL.....	17
2.10 FORWARD ERROR CORRECTION – FEC.....	17
2.11 SCRAMBLING.....	17
2.12 MAPEAMENTOS.....	18
<b>3 10 GIGABIT ETHERNET.....</b>	<b>21</b>
<b>4 MAPEAMENTO 10GBE LAN PHY EM OPU1E.....</b>	<b>22</b>
4.1 TAXAS DE TRANSMISSÃO.....	23
<b>5 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES.....</b>	<b>26</b>
<b>6 RECURSOS NECESSÁRIOS.....</b>	<b>29</b>
6.1 RECURSOS DE HARDWARE.....	29
6.2 RECURSOS DE SOFTWARE.....	29
6.3 FONTES DE PESQUISA.....	29
<b>7 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>30</b>

## Índice de Figuras

---

Figura 1 – Arquitetura do projeto X10GIGA. (1) Extração e tratamento de cabeçalhos; (2) Extração de carga útil 10GbE; (3) Inserção de carga útil 10GbE; (4) Inserção de cabeçalhos. ....	3
Figura 2 – Sinais de origens (clientes) distintos sendo transportados sobre OTN. Adaptado de [ALE01]. ....	4
Figura 3 – Estrutura lógica do padrão OTN. Adaptado de [ITU01]. ....	5
Figura 4 – Estrutura do quadro OTN. Adaptado de [KOC01]. ....	6
Figura 5 – Seqüência de transmissão dos bytes do quadro OTN. ....	6
Figura 6 – Estrutura do multi-quadro OTN. Adaptado de [ITU01]. ....	7
Figura 7 – Seqüência de transmissão do multi-quadro OTN. ....	7
Figura 8 – Estrutura dos cabeçalhos do multi-quadro OTN. Adaptado de [ITU01]. ....	8
Figura 9 – Terminações das estruturas OTU, ODU e OPU. Adaptado de [NAK01]. ....	8
Figura 10 – Estrutura do campo FAS. Adaptado de [ITU01]. ....	9
Figura 11 – Estrutura do campo MFAS. Adaptado de [ITU01]. ....	9
Figura 12 – Estrutura do campo SM. Adaptado de [ITU01]. ....	10
Figura 13 – Estrutura do campo TTI. Adaptado de [ITU01]. ....	11
Figura 14 – Ilustração da geração do BIP-8. Adaptado de [ITU01]. ....	12
Figura 15 – Estrutura do campo PM e do campo TCM. Adaptado de [ITU01]. ....	14
Figura 16 – Estrutura do campo FTFL. Adaptado de [ITU01]. ....	15
Figura 17 – Estrutura do OPU OH. Adaptado de [ITU01]. ....	16
Figura 18 – Processo de scrambling. Adaptado de [ITU01]. ....	17
Figura 19 – Estrutura do mapeamento de um sinal CBR2G5 em OPU <sub>1</sub> . Adaptado de [ITU01]. ....	19
Figura 21 – Estrutura do mapeamento de um sinal CBR40G em OPU <sub>3</sub> . Adaptado de [ITU01]. ....	20
Figura 23 – Previsão de servidores x86 em relação ao tipo de conexão Ethernet. Adaptado de [HAY01]. ....	21
Figura 24 – Estrutura de mapeamento sem bytes de preenchimento. Adaptado de [ITU03]. ....	23

## Índice de Tabelas

---

Tabela 1 – Interpretação do campo BEI/BIAE. Adaptado de [ITU01]. .....	13
Tabela 2 – Interpretação do campo STAT. Adaptado de [ITU01]. .....	14
Tabela 3 – Interpretação do campo Fault Type Indication do FTFL. Adaptado de [ITU01]. .....	15
Tabela 4 – Interpretação do campo PT. Adaptado de [ITU01]. .....	16
Tabela 5 – Correlação entre os mapeamentos CBR, interfaces SONET/SDH e as respectivas taxas de transmissão. .	18
Tabela 6 – Mapeamentos a serem implementados de acordo com a sua prioridade dentro do projeto. ....	22
Tabela 7 – Relação entre as taxas de transmissão de acordo com a sobrecarga referente às estruturas lógicas do quadro OTN. ....	23
Tabela 8 – Definição de variáveis. Apêndice I [ITU01]. .....	24
Tabela 9 – Valores utilizados para encontrar $\alpha$ . .....	25
Tabela 10 – Cronograma de Atividades. ....	26

## Lista de Siglas

---

10GbE	–	10 Gigabit Ethernet
40GbE	–	40 Gigabit Ethernet
100GbE	–	100 Gigabit Ethernet
API	–	Access Point Identifier
APS	–	Automatic Protection Switching Coordination
ATM	–	Asynchronous Transfer Mode
BDI	–	Backward Defect Indication
BEI	–	Backward Error Indication
BER	–	Bit Error Rate
BIAE	–	Backward Incoming Alignment Error
BIP-8	–	Bit Interleaved Parity – Level 8
CBR	–	Constant Bit Rate
DAPI	–	Destination Access Point Identifier
DW	–	Digital Wrapper
DWDM	–	Dense Wavelength Division Multiplexing
EXP	–	Experimental
FA OH	–	Frame Alignment Overhead
FAS	–	Frame Alignment Signal
FEC	–	Forward Error Correction
FS	–	Fixed Stuff
FTFL	–	Fault Type & Fault Location Reporting Channel
GCC	–	General Communication Channel
GbE	–	Gigabit Ethernet
GFP	–	Generic Framing Procedure
IAE	–	Incoming Alignment Error
IP	–	Internet Protocol
ITU	–	International Telecommunication Union
ITU-T	–	International Telecommunication Union – Telecommunication
JC	–	Justification Control
LAN	–	Local Area Network
MFAS	–	MultiFrame Alignment Signal
NJO	–	Negative Justification Opportunity
OA	–	Optical Alignment
ODU	–	Optical Channel Data Unit
ODU OH	–	Optical Channel Data Unit Overhead
ODTU	–	Optical Channel Data Tributary Unit
ODTUG	–	Optical Channel Data Tributary Unit Group
OPS	–	Optical Packet Switched
OPU	–	Optical Channel Payload Unit
OPU OH	–	Optical Channel Payload Unit Overhead
OTN	–	Optical Transport Network
OTU	–	Optical Channel Transport Unit
OUT OH	–	Optical Channel Transport Unit Overhead
PCC	–	Protection Communication Channel Control
PHY	–	Physical Layer
PJO	–	Positive Justification Opportunity
PM	–	Path Monitoring
PSI	–	Payload Structure Identifier
PT	–	Payload Type
RES	–	Reserved for future international standardization
RS	–	Reed-Solomon
SAPI	–	Source Access Point Identifier

SDH	–	Synchronous Digital Hierarchy
SM	–	Section Monitoring
SONET	–	Synchronous Optical Network
STAT	–	Status
TCM	–	Tandem Connection Monitoring
TCM ACT	–	TCM Activation/Deactivation Control Channel
TDM	–	Time Division Multiplexing
TTI	–	Trail Trace Identifier
WAN	–	Wide Area Network
WDM	–	Wavelength Division Multiplexing

## Termos e Definições

---

- Amplificador** – Dispositivo que permite aumentar na sua saída o nível do sinal de entrada. Pode ser utilizado em redes de telecomunicações para repor níveis de sinal, que se degradam por efeito da atenuação nas linhas [DIG01].
- Assíncrono** – Significa que os caracteres que formam os pacotes/quadros de dados são enviados em intervalos irregulares [DIG01].
- Cabeçalho** – No contexto de sistemas digitais de telecomunicações, cabeçalho é a parte de um quadro que contém informações de controle e gerenciamento em contraposição a parte que contém a informação a ser transmitida (*payload*) [DIG01].
- Carga Útil** – Payload, ou carga útil, em protocolos de comunicação refere-se ao dado real a ser transmitido [WIK02].
- Célula** – Unidade de transmissão de comprimento fixo que é a base do ATM. Cada célula tem 53 bytes de comprimento, dividido em 48 bytes para área de dados e 5 bytes para o cabeçalho [DIG01].
- Clock** – Em eletrônica e especialmente em circuitos digitais síncronos, o clock é um sinal usado para coordenar as ações de um ou mais circuitos eletrônicos. Um sinal de clock oscila entre os estados alto e baixo, geralmente gerando uma onda quadrada [WIK04].
- Enlace** – Também conhecido como Link. Circuito de comunicação ou via de transmissão conectando dois pontos [DIG01].
- Escalabilidade** – Característica do sistema ou equipamento que pode crescer em escala, isto é, que possibilita incrementos de capacidade ou funcionalidades acompanhando as necessidades dos usuários [DIG01].
- Ethernet** – Tecnologia de interconexão para redes locais – Local Area Networks (LAN) – baseada no envio de pacotes [WIK03].
- Fibra Óptica** – A fibra óptica é um cilindro de SiO<sub>2</sub> (vidro) com núcleo e revestimento com índices de refração diferentes. Utilizada para transmissão de informação, apresenta atenuação extremamente baixa possibilitando transmissão de alta capacidade [DIG01].
- Hardware** – Termo em inglês de uso generalizado pelo qual se designa o conjunto de componentes físicos (mecânicos, magnéticos e eletrônicos) constituintes de um sistema [DIG01].
- Mapeamento** – Processo utilizado em protocolos para adaptar o sinal de um cliente dentro de seu sinal para que esse seja transportado.
- Multiplexação** – Transmissão de vários sinais, usando uma única linha de comunicação ou canal [DIG01].
- Operadora** – Companhia que fornece circuitos de comunicação, também conhecido como *carrier*. Também é o termo usado no Brasil em referência às operadoras de serviços públicos de telecomunicações, sendo mais aplicado às operadoras de longa distância como Embratel/MCI e Intelig. Mas também pode ser utilizado para designar operadores de serviços de telecomunicações de valor adicionado como, por exemplo, GlobalOne, MetroRed e Netstream [DIG01].
- Pacote** – Termo de comunicação de dados para uma sequência de bits formada por dados do usuário e precedidos de um cabeçalho de controle que permite que o pacote seja encaminhado pela rede para seu destino [DIG01].
- Paridade** – No contexto das telecomunicações, paridade refere-se ao número de bits “1” de um determinado número binário. Para assinalar a paridade, é adicionado, no

final de uma sequência binária, um dígito binário de paridade. A paridade é amplamente utilizada para detectar erros nas transmissões, já que o seu cálculo é extremamente simples. Por exemplo, se for anexado um bit de paridade extra a cada byte transmitido, um erro pode ser detectado se a paridade do byte não coincidir com o bit de paridade [WIK05].

- Protocolo** – Conjunto de regras para transmissão de dados entre dois dispositivos. O protocolo pode ser implementado tanto em hardware com em software [DIG01].
- Quadro** – Pacote transmitido através de uma linha serial. O termo é derivado de um protocolo orientado a caractere que adiciona caracteres especiais de início e fim de quadros (*frames*) na transmissão de pacotes [DIG01].
- Regenerador** – Dispositivo que regenera os sinais para que eles possam trafegar em segmentos adicionais de cabo para aumentar o alcance ou para acomodar outros dispositivos ao segmento.
- Roteador** – Identifica e processa o direcionamento de pacotes de dados – por meio de seus endereços – de uma rede local (LAN) ou remota (WAN) para outra [DIG01].
- Síncrono** – Significa que os caracteres que formam os pacotes/quadros de dados são enviados em intervalos regulares. São sinais que são gerados na mesma referência de tempo e tem a mesma frequência [DIG01].
- Sobrecarga** – Informação adicional transmitida junto ao pacote/quadro.
- Switch** – Dispositivo mecânico ou eletrônico que direciona o fluxo de sinais elétricos ou ópticos de um lado para outro [DIG01].
- Telemática** – Ramo da engenharia que associa conhecimentos das áreas de eletrônica, telecomunicações e informática [DIG01].
- Transponder** – Dispositivo que recebe, amplifica e retransmite um sinal em uma frequência diferente ou transmite uma mensagem pré-determinada em resposta a um sinal pré-definido anteriormente. Uma combinação de receptor, conversor de frequência e transmissor [DIG01].
- Tributários** – Espaços alocados dentro da carga útil de um quadro para que vários clientes insiram seus sinais de forma concorrente.



## Convenções

---

- Para a representação de números em binário (base 2) no corpo do texto será usada a notação “#####...#” onde  $\# \in \{0,1\}$ .
- Para a representação de números em hexadecimal (base 16) no corpo do texto será usada a notação  $x\text{“#####...#”}$  onde  $\# \in \{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,A,B,C,D,E,F\}$ .
- **k**: O índice "k" é utilizado para indicar a taxa de transmissão e as diferentes versões de  $OPU_k$ ,  $ODU_k$  e  $OTU_k$ .  $k = 1$  representa uma taxa de transmissão aproximada de 2,5 Gbits/s,  $k = 2$  indica uma taxa de transmissão aproximada de 10 Gbits/s, e  $k = 3$  representa uma taxa de transmissão aproximada de 40 Gbits/s.
- **Optical Channel Transport Unit ( $OTU_k$ )**: O  $OTU_k$  é a estrutura lógica utilizada para transporte de um  $ODU_k$  sobre uma ou mais conexões de canais ópticos. É composto pelo  $ODU$  e cabeçalho específico do  $OTU_k$  (FEC e cabeçalho para gerência de conexão de um canal óptico). É caracterizado pela estrutura de seu quadro, taxa de transmissão e largura de banda. São definidas capacidades do  $OTU_k$  para  $k = 1$ ,  $k = 2$  e  $k = 3$ .
- **Optical Channel Data Unit ( $ODU_k$ )**: O  $ODU_k$  é a estrutura lógica que contém a informação relacionada a carga útil ( $OPU_k$ ) e cabeçalho específico do  $ODU_k$ . São definidas capacidades do  $ODU_k$  para  $k = 1$ ,  $k = 2$  e  $k = 3$ .
- **Optical Channel Payload Unit ( $OPU_k$ )**: O  $OPU_k$  é a estrutura lógica utilizada para adaptar a informação do cliente para transporte sobre um canal óptico. Compreende a informação do cliente juntamente com qualquer cabeçalho necessário para realizar adaptação entre a taxa de transmissão do sinal do cliente e a taxa de transmissão da carga útil do  $OPU_k$  e cabeçalho específico do  $OPU_k$  utilizado para dar suporte ao transporte do sinal do cliente. Esse cabeçalho é exclusivamente utilizado para adaptação. São definidas capacidades do  $OPU_k$  para  $k = 1$ ,  $k = 2$  e  $k = 3$ .

# 1 Introdução

---

A popularização do uso da rede mundial de computadores e a disponibilidade diversificada de serviços, que exigem alta largura de banda, fazem com que a área de telecomunicações avance constantemente, para atender o rápido crescimento da demanda por informação. Além disso, aplicações sobre vídeo e voz, por exemplo, possuem restrições que devem ser respeitadas para atenderem seus propósitos. Somado a tudo isso, o valor da informação faz com que as empresas de telecomunicação se empenhem no desenvolvimento de novas tecnologias que atendam as necessidades globais.

O uso de *fibras ópticas* na construção de redes de telecomunicação tem se intensificado, a mais de 10 anos, por permitir *protocolos* mais rápidos e conexões mais longas, devido a transmissões com taxas muito elevadas (aproximadamente 50Tbps) [GUE01] com menor perda de potência do sinal e por ser menos susceptível a vários tipos de interferência. Outra vantagem é a capacidade de *multiplexação* do comprimento de onda, que permite a transmissão de vários sinais ópticos numa única fibra. DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) é a técnica que permite a multiplexação e acrescenta flexibilidade e *escalabilidade* às vantagens do emprego da fibra óptica na telecomunicação.

A recomendação G.709 – *Interfaces for the Optical Transport Network* (OTN), criada pela ITU-T (International Telecommunications Union – Telecommunication), surge no intuito de definir um padrão que possa aproveitar melhor a tecnologia de fibra óptica, sem a necessidade de descartar os padrões e tecnologias já existentes. A sua principal justificativa é a presença de uma técnica de correção de erros superior a de seus antecessores, os padrões SONET e SDH, permitindo assim *enlaces* mais longos.

Atualmente, a maioria das redes ópticas são multiplexadas no tempo (TDM - *Time Division Multiplexing*), onde cada cliente insere o seu sinal no canal em sua respectiva janela de tempo, denominada tributário [FIL01]. Um exemplo disso seria *roteadores* IP, interconectados a um *switch* ATM, que multiplexa os canais no tempo para transmissão numa rede óptica SONET/SDH. A utilização de vários protocolos gera um acúmulo de sobrecarga, como *cabeçalhos*, na transmissão dos dados. Isso trouxe os esforços da indústria para o desenvolvimento de redes ópticas transparentes a protocolos. Essas redes, denominadas OPS (*Optical Packet Switched*) [GUE01], precisam também suportar *Ethernet*, o que não acontecia com SONET/SDH. A solução para esses problemas são parte do propósito do OTN.

## 1.1 Motivação

A importância da telecomunicação no mundo e suas necessidades traduzem o interesse e o esforço voltado para esse campo. O desenvolvimento de uma tecnologia nacional para suprir a necessidade de canais de comunicação de alta velocidade em enlaces de fibra óptica de longa distância, já é suficiente para motivar esse trabalho. Junto a isso, a parceria entre a TERACOM Telemática Ltda., empresa brasileira de telecomunicações, e o Grupo de Apoio ao Projeto de Hardware (GAPH), da Faculdade de Informática (FACIN) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), entram com o interesse do desenvolvimento do projeto X10GIGA. Esse co-financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), TERACOM e PUCRS.

## 1.2 Objetivos

O objetivo do presente trabalho é desenvolver módulos em *hardware* para extração e inserção de carga útil, inicialmente do tipo 10GbE (*10 Gigabit Ethernet*), em quadros do tipo OTN. Esses módulos serão inseridos no projeto X10GIGA e funcionarão em conjunto com os módulos já desenvolvidos para o transponder OTN.

Esse trabalho envolve o estudo de normas relacionadas ao padrão OTN, em especial a norma ITU-T G.709, para a realização do projeto dos módulos e implementação de uma arquitetura de teste para a verificação lógica antes e após a *prototipação*.

## 1.3 Resultados Esperados

Ao final desse trabalho de conclusão de curso é esperado que os módulos de *hardware* desenvolvidos sejam capazes de:

- Receber *quadros* OTN alinhados, desembaralhados e sem erros para fazer a análise do cabeçalho com o objetivo de verificar a *paridade* e o controle de justificativa do mesmo, item (1) da Figura 1;
- Extrair a carga útil de quadros OTN e transmitir para clientes 10GbE, respeitando os requisitos de velocidade de transmissão, assim como, o controle das variações possíveis das taxas de transmissão e recebimento, item (2) da Figura 1;
- Receber *pacotes* 10GbE do *cliente* e inserir como carga útil em quadros OTN, respeitando os requisitos de velocidade de transmissão, assim como, o controle das variações possíveis das taxas de transmissão e recebimento, item (3) da Figura 1;

- Tratar e inserir cabeçalhos no quadro OTN para transmissão a outro nodo OTN, item (4) da Figura 1.

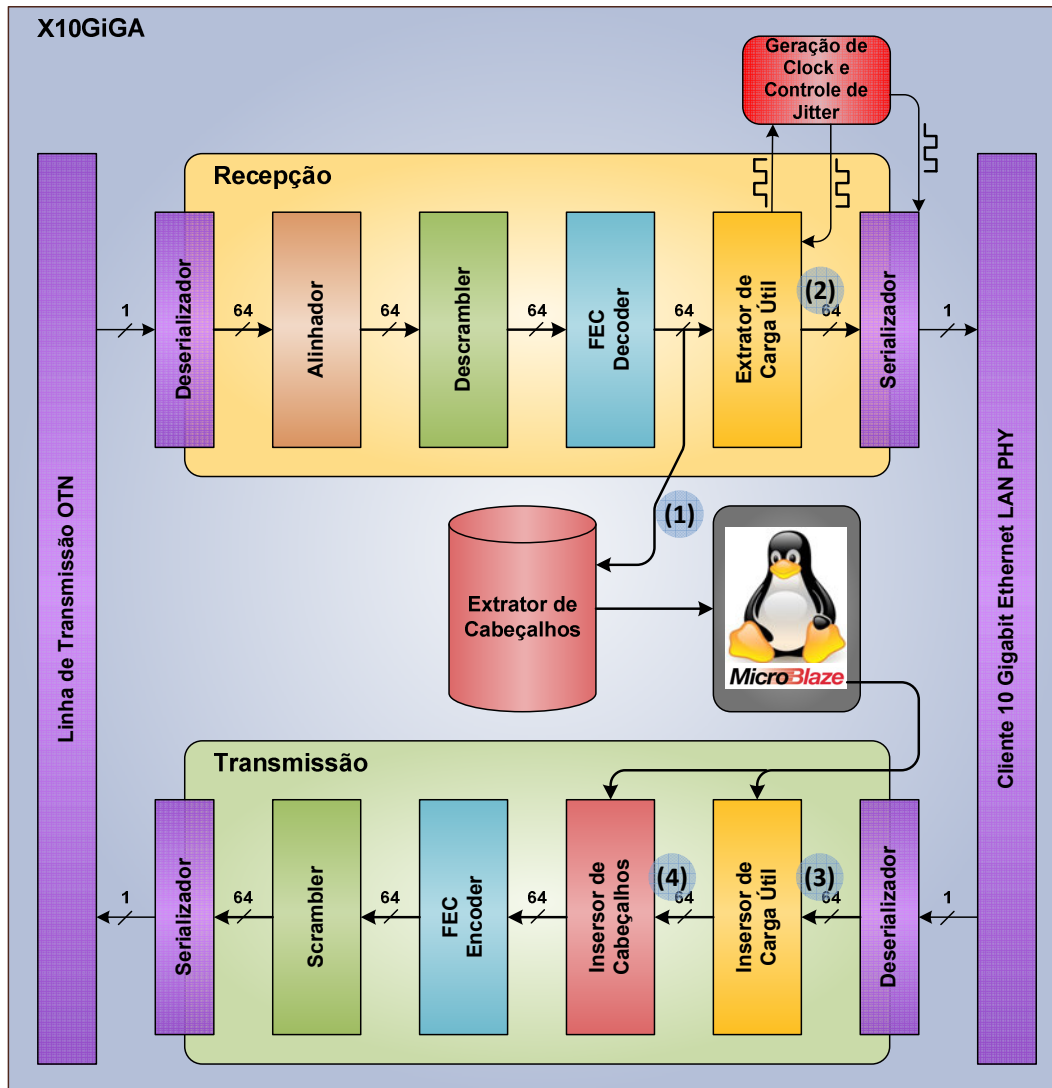


Figura 1 – Arquitetura do projeto X10GIGA. (1) Extração e tratamento de cabeçalhos; (2) Extração de carga útil 10GbE; (3) Inserção de carga útil 10GbE; (4) Inserção de cabeçalhos.

## 2 Padrão OTN - Recomendação G.709

A ITU-T é um setor da *International Telecommunication Union* (ITU) responsável por analisar as necessidades e organizar grupos para o estudo e a criação de recomendações para a área de telecomunicações. O padrão OTN é descrito na recomendação G.709, *Interfaces for the Optical Transport Network*, da ITU-T. Essa define *Optical Transport Network* (OTN) como um conjunto de elementos de redes ópticas (*Optical Network Elements*) conectados por enlaces de fibra óptica, capazes de fornecer funcionalidades de transporte, *multiplexação*, roteamento, gerenciamento e supervisão de canais ópticos transportando sinais de clientes que podem ser de origens distintas, como mostra a Figura 2.

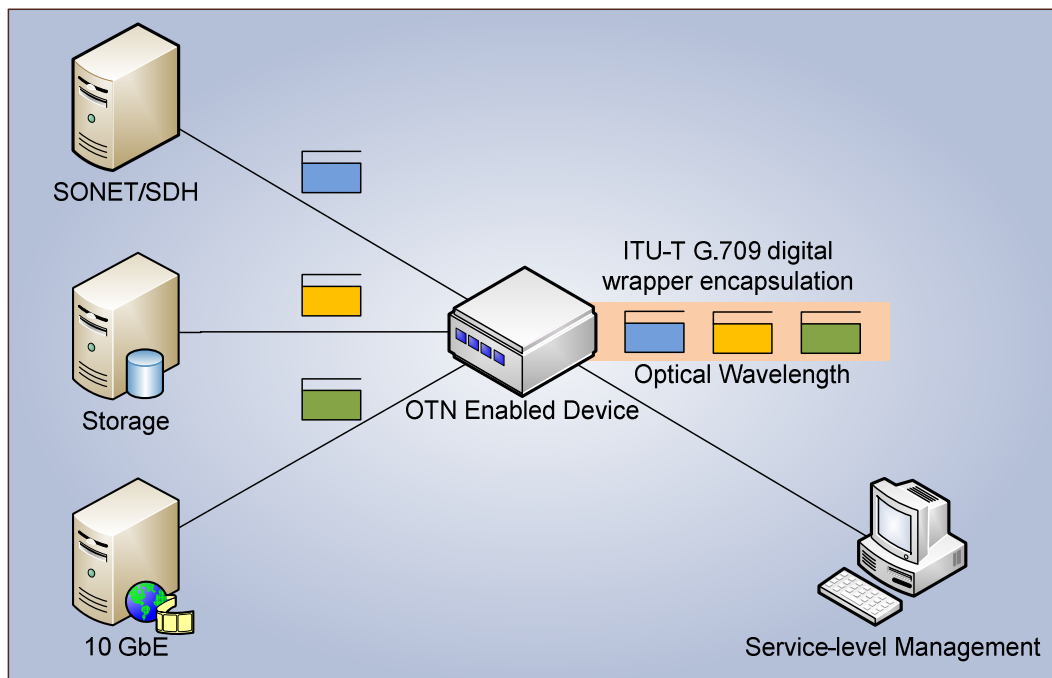


Figura 2 – Sinais de origens (clientes) distintas sendo transportados sobre OTN. Adaptado de [ALE01].

Redes ópticas, multiplexadas no tempo (TDM), com enlaces pequenos, são bastante viáveis, porém quando falamos de longos canais ópticos, surge a necessidade de adicionar *amplificadores e regeneradores*, o que encarece a rede. O padrão OTN, por ser multiplexado em comprimento de onda (WDM), precisa somente de um regenerador para vários canais, diminuindo o custo da rede. Porém, a característica mais importante do padrão OTN é a presença da técnica de correção de erros baseada no algoritmo de Reed-Solomon(255, 239) que consegue corrigir até 128 bytes em rajada por quadro, permitindo enlaces mais longos.

Existem outras importantes propriedades das redes OTN. Uma delas é a transparência de protocolo, ou seja, o padrão OTN encapsula os dados do cliente na sua carga útil mantendo as suas características originais enquanto estes são transmitidos em enlaces ópticos. Por esta razão o padrão OTN pode ser entendido como uma embalagem digital (DW – Digital Wrapper) [YOU01], que permite a reutilização de grande parte dos padrões já existentes, sem a necessidade de pilhas dentro de pilhas de protocolos, conseqüentemente diminuindo a *sobrecarga* transmitida. Além disso, é o único padrão capaz de transportar 10GbE LAN PHY inteiramente [CIE01]. Outra qualidade do padrão OTN é a *escalabilidade*, resultante da sua tecnologia de multiplexação que possibilita transportar dados de vários clientes ao mesmo tempo, como apresentado na Figura 2.

## 2.1 Estrutura Lógica do Padrão OTN G.709

O quadro OTN é composto por três macro-blocos: cabeçalho, carga útil e FEC (*Forward Error Correction*). Esse quadro possui a estrutura lógica apresentada na Figura 3 onde o sinal do cliente é encapsulado na estrutura *Optical Channel Payload Unit* (OPU) para transporte em enlace óptico. O OPU une a informação do cliente com os cabeçalhos necessários para execução de ajuste entre a taxa de transmissão do sinal do cliente e a taxa de transmissão da carga útil do OPU, juntamente com qualquer outra informação relacionada ao *mapeamento* do sinal do cliente. Por sua vez, o OPU, é encapsulado em uma estrutura denominada *Optical Channel Data Unit* (ODU) que possui, além da informação do OPU, campos de cabeçalho referentes à camada de dados. O ODU possibilita a monitoração da transmissão do OPU fim a fim na rede. Ao ODU são adicionados *bytes* de FEC e o sinal que permite o alinhamento do quadro (utilizado para indicar o início da estrutura) [TRO01], assim como informação necessária para o transporte do ODU em um canal óptico, esta estrutura é denominada *Optical Channel Transport Unit* (OTU).

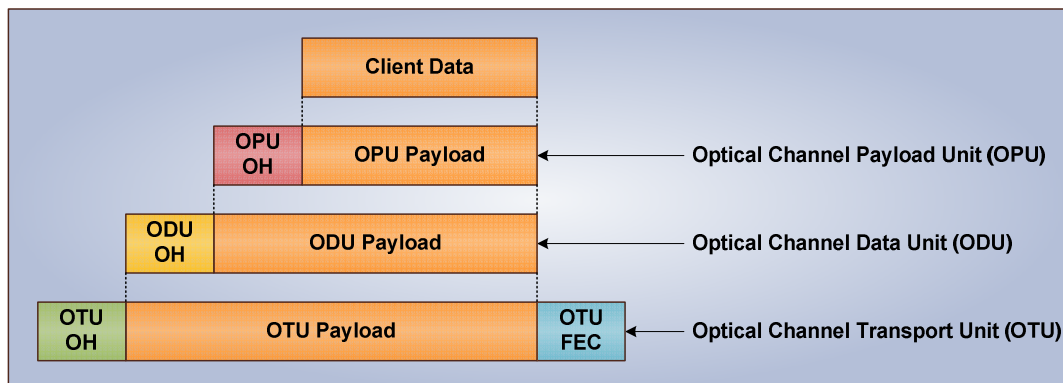


Figura 3 – Estrutura lógica do padrão OTN. Adaptado de [ITU01].

## 2.2 Quadro

O quadro OTN é composto, segundo a organização proposta em [KOC01], por 16 linhas de 255 bytes, totalizando 4080 bytes, e é dividido em três macro-blocos: cabeçalho (*overhead*) com 16 bytes (uma coluna), carga útil (*payload*) com 3808 bytes (238 colunas) e FEC com 256 bytes (16 colunas), como visto na Figura 4. O quadro é transmitido coluna a coluna, como apresenta a Figura 5.

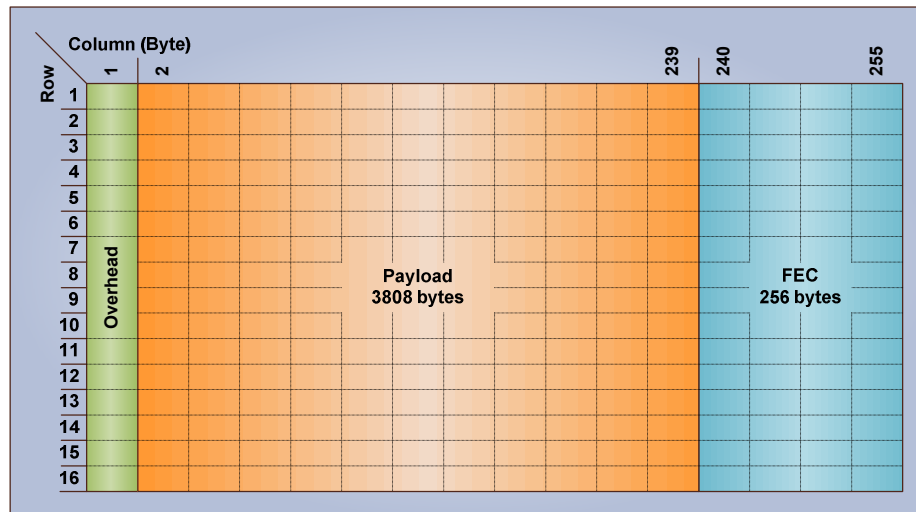


Figura 4 – Estrutura do quadro OTN. Adaptado de [KOC01].

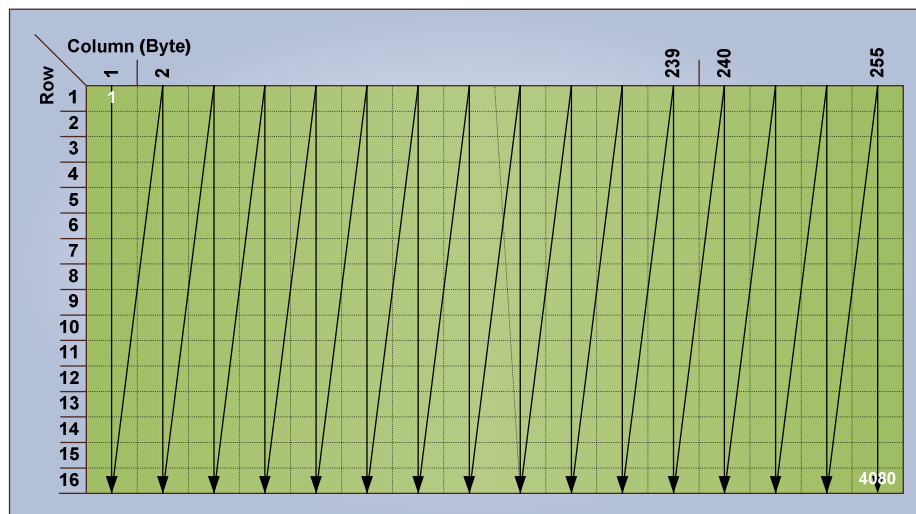


Figura 5 – Sequência de transmissão dos bytes do quadro OTN.

## 2.3 Multi-Quadro

A recomendação G.709 [ITU01] define que o multi-quadro (*multiframe*) OTN, Figura 6, consiste em quatro linhas de 4080 bytes, ou seja, quatro quadros totalizando 16320 bytes. Ao respeitar a sequência de transmissão dos bytes linha a linha, como

apresenta a Figura 7, tem-se a mesma organização apresentada no quadro da Figura 4, com cabeçalho, carga útil e FEC a cada linha do multi-quadro OTN.

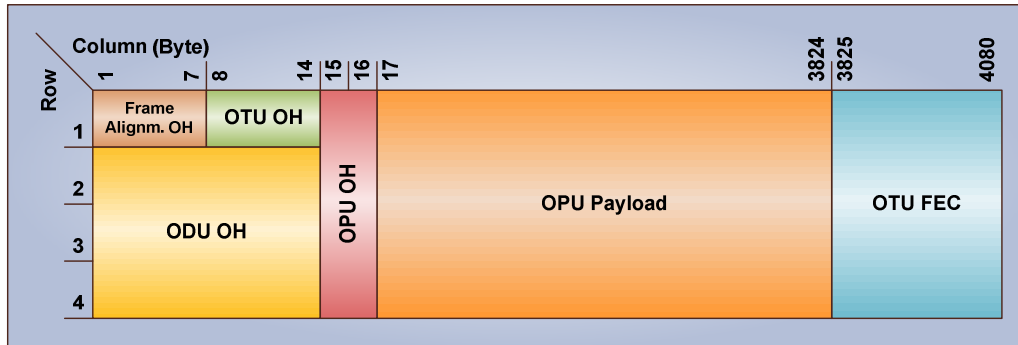


Figura 6 – Estrutura do multi-quadro OTN. Adaptado de [ITU01].

A partir da organização proposta de um multi-quadro pode-se visualizar a estrutura lógica do padrão OTN G.709 apresentada na seção 2.2.

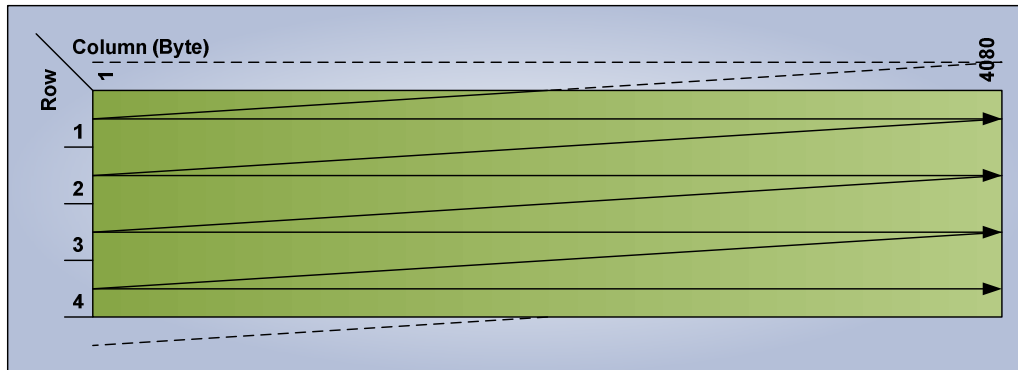


Figura 7 – Sequência de transmissão do multi-quadro OTN.

## 2.4 Estrutura do Cabeçalho

Na área destinada ao cabeçalho se encontram os dados de controle utilizados na transmissão do multi-quadro OTN. Esses têm por objetivo, *e.g.*, transportar informações referentes a funções de *supervisionamento*, condicionamento de transporte entre canais ópticos, monitoramento de conexões, adaptação do sinal do cliente para transporte sobre um canal óptico, controle de falhas e alarmes [PAI01]. Na Figura 8 observa-se o cabeçalho do multi-quadro OTN dividido em quatro partes distintas conforme definição da recomendação G.709 [ITU01], na linha (*row*) 1, colunas (*column*) 1 a 7, se tem o *Frame Alignment Overhead* (FA OH), em seguida o *Optical Channel Transport Unit Overhead* (OTU OH), colunas 8 a 14. Nas linhas 2 a 4, da coluna 1 a 14, aparece o *Optical Channel Data Unit Overhead* (ODU OH) e, por fim, nas colunas 15 e 16 das 4 linhas observa-se o *Optical Channel Payload Unit Overhead* (OPU OH).



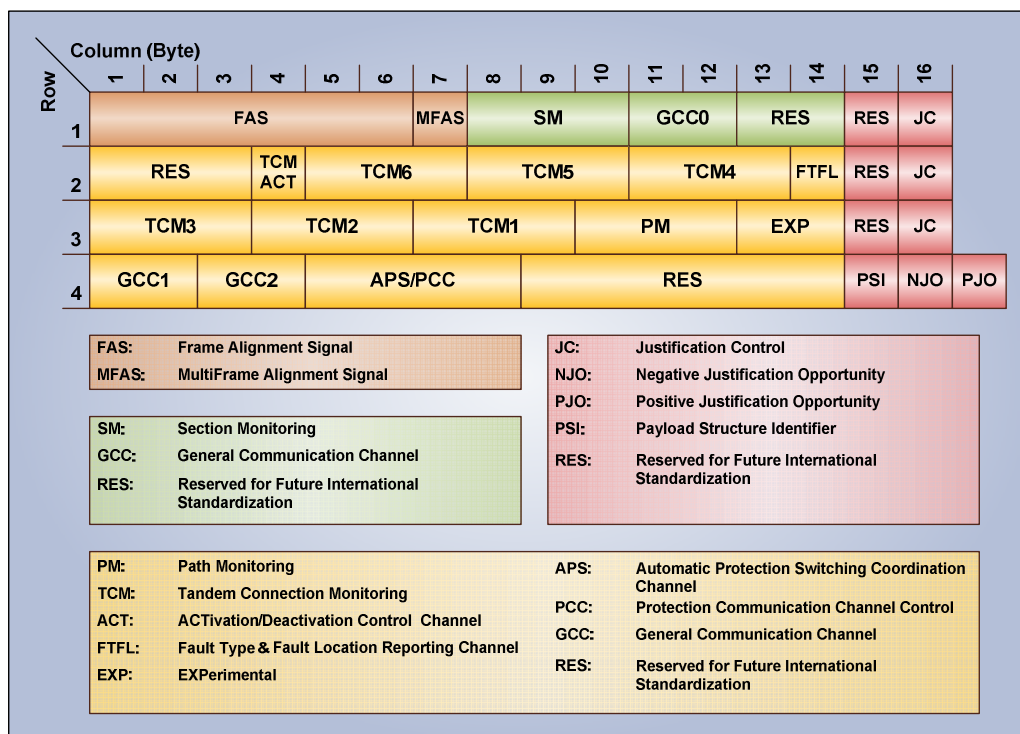


Figura 8 – Estrutura dos cabeçalhos do multi-quadro OTN. Adaptado de [ITU01].

A Figura 9 mostra as terminações de cada uma das estruturas lógicas do multi-quadro dentro de uma rede OTN.

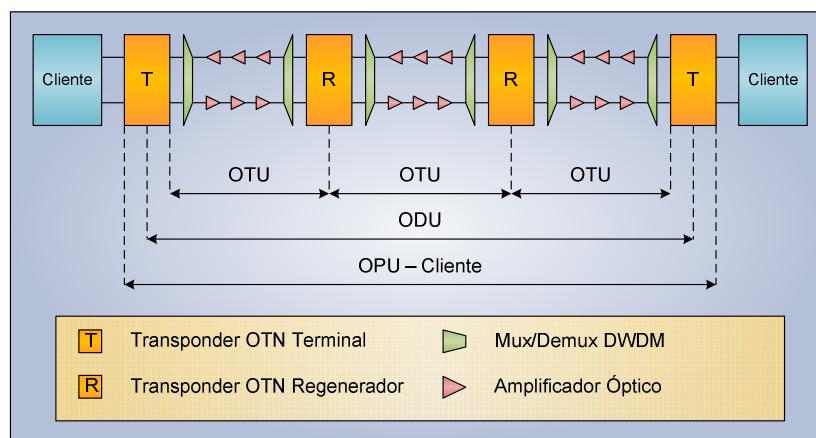


Figura 9 – Terminações das estruturas OTU, ODU e OPU. Adaptado de [NAK01].

## 2.5 Frame Alignment Overhead (FA OH)

O *Frame Alignment Overhead* (FA OH) possui dois campos, o FAS e o MFAS, que servem para detecção do início do multi-quadro e para controle da sequência em que as informações dos multi-quadros são transmitidas.

O Frame Alignment Signal (FAS) serve para indicar o início do multiquadro OTN e é definido como 6 bytes, bytes 1 a 6 da primeira linha, que possuem a sequência

$x$ “F6F6F6282828”, apresentada na Figura 10 em binário, sendo o byte  $x$ “F6” definido como OA1 (*Optical Alignment 1*) e o byte  $x$ “28” definido como OA2 (*Optical Alignment 2*).

FAS OH Byte 1	FAS OH Byte 2	FAS OH Byte 3	FAS OH Byte 4	FAS OH Byte 5	FAS OH Byte 6
1111 0110	1111 0110	1111 0110	0010 1000	0010 1000	0010 1000
OA1	OA1	OA1	OA2	OA2	OA2

Figura 10 – Estrutura do campo FAS. Adaptado de [ITU01].

Alguns cabeçalhos do OTU e do ODU são montados durante a recepção de múltiplos multi-quadros, para isso é necessário um processo de alinhamento [ITU01]. Para controlar esse processo existe o MultiFrame Alignment Signal (MFAS) que é definido como o sétimo byte da primeira linha do multi-quadro OTN, e atua como um contador de 8 *bits* que incrementa a cada multi-quadro, variando de 0 a 255, conforme é demonstrado na Figura 11 (em binário).

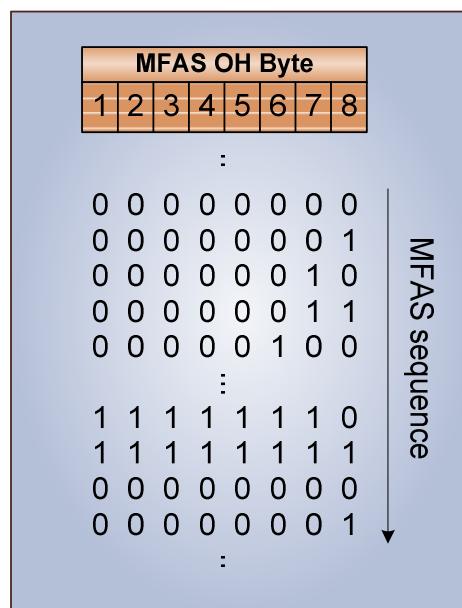


Figura 11 – Estrutura do campo MFAS. Adaptado de [ITU01].

Quando um campo de cabeçalho contém uma informação que possui mais bytes do que seu espaço delimitado dentro de um multi-quadro OTN, sua informação é alinhada à sequência do MFAS, para que a informação completa do campo seja transmitida a cada 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 ou 256 multi-quadros, de acordo com o seu tamanho.

## 2.6 Optical Channel Transport Unit Overhead (OTU OH)

O *Optical Channel Transport Unit Overhead* (OTU OH) possui dois campos, o SM e o GCC0, e um espaço reservado para futura padronização (RES). Esses campos possuem informações utilizadas entre seções, como apresentado na Figura 9. O campo GCC0 (*General Communication Channel*) possui dois bytes, colunas 11 e 12 da primeira linha do multi-quadro, e é utilizado como um canal de comunicação entre as terminações de seção do OTU.

O campo *Section Monitoring* (SM) é definido nos bytes 8 a 10 da primeira linha do multi-quadro OTN e é subdividido em outros três campos, são eles, *Trail Trace Identifier* (TTI), *Bit Interleaved Parity – Level 8* (BIP-8) e um campo de alarmes subdividido em *Backward Error Indication and Backward Incoming Alignment Error* (BEI/BIAE), *Backward Defect Indication* (BDI), *Incoming Alignment Error* (IAE) e dois bits reservados para futura padronização. O campo SM é ilustrado na Figura 12.

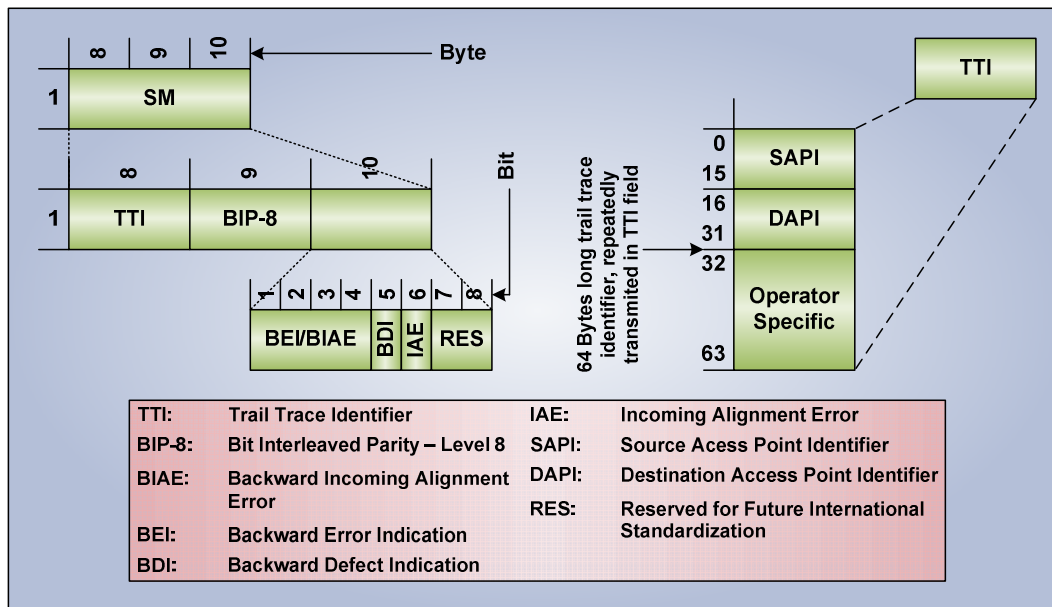


Figura 12 – Estrutura do campo SM. Adaptado de [ITU01].

O campo *Trail Trace Identifier* (TTI) é um exemplo de informação que é transmitida utilizando sincronização com o MFAS. É definido como uma string de 64 bytes, Figura 13, e obedece a seguinte estrutura [ITU01]:

- TTI[0] contém o caractere SAPI[0] (*Source Access Point Identifier*), que é sempre preenchido com zeros;
- TTI[1] até TTI[15] contém os 15 caracteres do SAPI (SAPI[1] a SAPI[15]);

- TTI[16] contém o caractere DAPI[0] (*Destination Access Point Identifier*), que é sempre preenchido com zeros;
- TTI[17] até TTI[31] contém os 15 caracteres do DAPI (DAPI[1] a DAPI[15]);
- TTI[32] até TTI[63] são de uso específico da operadora e não estão definidos na recomendação G.709.

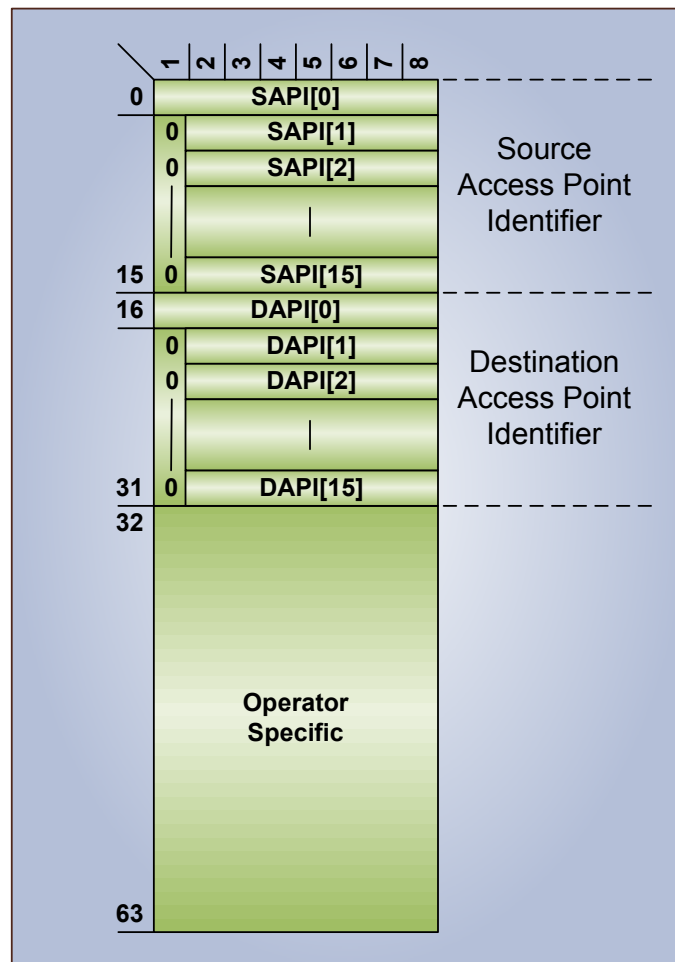


Figura 13 – Estrutura do campo TTI. Adaptado de [ITU01].

As informações contidas nos *Access Point Identifiers* (APIs) são utilizadas para roteamento, no caso do TTI do campo SM é utilizado entre seções, como visto na Figura 9, e tem por funcionalidades:

- Serem globalmente únicas em sua camada de rede;
- Devem estar disponíveis para outras operadoras de rede, quando necessário;
- Não devem mudar enquanto o *Access Point* existir;

- O conjunto de todos os APIs pertencentes a uma única camada administrativa de rede deve formar um único esquema de API;
- Podem ser independentes de qualquer esquema de outra camada administrativa de rede.

Os 64 bytes do TTI são alinhados à informação do MFAS, ou seja, são enviados 4 vezes a cada 256 transições da sequência do MFAS e têm início nas posições 0 (x“00”), 64 (x“40”), 128 (x“80”) e 192 (x“C0”).

O campo *Bit Interleaved Parity – Level 8* (BIP-8) é utilizado para detecção de erros. O BIP-8 é computado sobre os bits do OPU, colunas 15 até 3824, área do multi-quadro *frame i*, e o resultado é inserido no campo BIP-8 do OTU OH do multi-quadro *frame i+2*, como é apresentado na Figura 14.

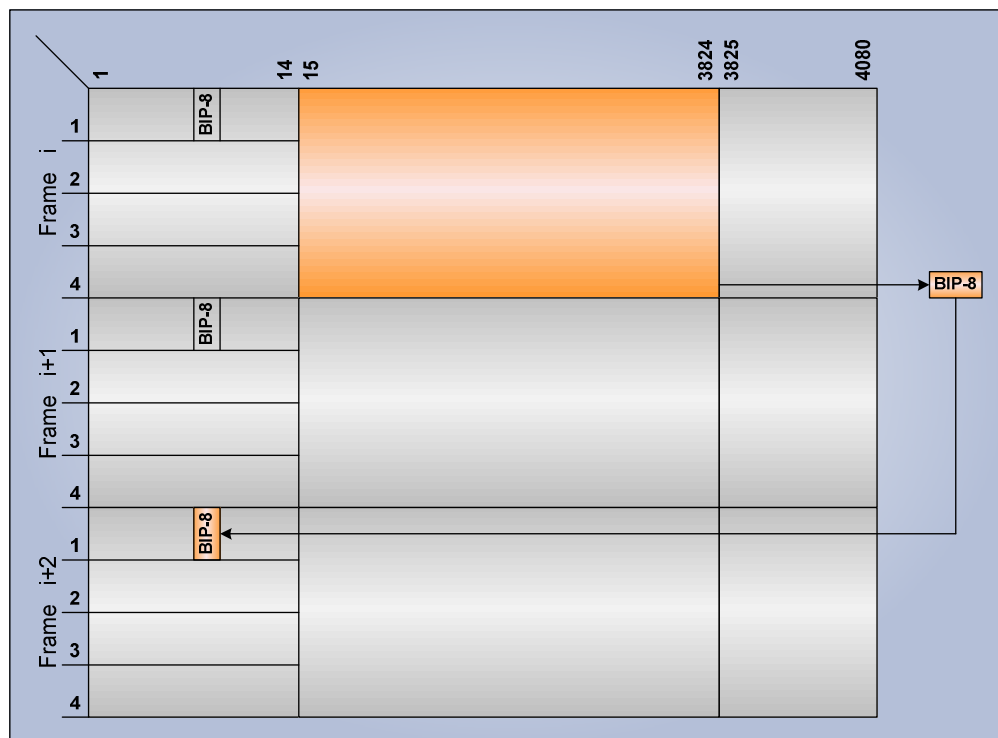


Figura 14 – Ilustração da geração do BIP-8. Adaptado de [ITU01].

Para monitoração da seção são definidos 4 bits para *Backward Error Indication* (BEI) e *Backward Incoming Alignment Error* (BIAE). Esses bits são usados para o receptor informar ao transmissor a quantidade de blocos com erro detectados pelo cálculo e análise da informação do BIP-8. Também envia ao transmissor a informação de que houve um erro de alinhamento e este está indicado no campo IAE. A informação do campo BEI/BIAE é formada de acordo com a Tabela 1.

**Tabela 1 – Interpretação do campo BEI/BIAE. Adaptado de [ITU01].**

OTU SM BEI/BIAE					BIAE	BIP violations
Bits	1	2	3	4		
	0	0	0	0	false	0
	0	0	0	1	false	1
	0	0	1	0	false	2
	0	0	1	1	false	3
	0	1	0	0	false	4
	0	1	0	1	false	5
	0	1	1	0	false	6
	0	1	1	1	false	7
	1	0	0	0	false	8
	1	0	0	1	false	0
	1	0	1	0	false	0
	1	0	1	1	true	0
	1	1	0	0	false	0
	.	.	.	.	.	.
	1	1	1	1	false	0

Para monitoramento de seção, um único bit é definido como sinal para o receptor informar ao transmissor que uma falha foi detectada na terminação onde foi recebido o sinal. Esse bit é denominado *Backward Defect Indication* (BDI) e possui o valor “1” em caso de falha e “0” caso contrário.

Quando detectado um erro de alinhamento no multi-quadro OTN o bit *Incoming Alignment Error* (IAE) é alterado para “1”, caso contrário é mantido em “0”.

## 2.7 Optical Channel Data Unit Overhead (ODU OH)

O *Optical Channel Data Unit Overhead* (ODU OH) possui os campos PM, FTFL, TCM<sub>i</sub> (i = 1..6), TCM ACT, GCC1, GCC2, APS/PCC, além de bytes reservados para futura padronização (RES) e uso experimental (EXP), não definidos na recomendação G.709. O ODU OH permite o monitoramento do caminho percorrido pelo multi-quadro quando esse necessita passar por operadoras distintas para chegar ao seu destino. Este processo é denominado *tandem connection* e seus campos de monitoramento dentro do ODU OH são o TCM<sub>i</sub> (i=1..6) e o TCM ACT. As descrições funcionais do monitoramento de tandem connection, dos canais de comunicação global (GCC1 e GCC2) e do campo de proteção APS/PCC não serão apresentadas, pois as funcionalidades desses campos não serão implementadas no escopo deste trabalho.

O campo *Path Monitoring* (PM) é definido nos bytes 10 a 12 da terceira linha do multi-quadro OTN, é subdividido em outros três campos, são eles, *Trail Trace Identifier* (TTI), *Bit Interleaved Parity – Level 8* (BIP-8) e um campo de alarmes. Esse campo de alarmes é subdividido em *Backward Error Indication* (BEI), *Backward Defect*

*Indication* (BDI) e *Status* (STAT). O campo PM pode ser visualizado na Figura 15 e seus sub-campos que possuem o mesmo nome de campos do SM têm as mesmas funcionalidades descritas anteriormente, aplicadas ao contexto do ODU, conforme Figura 9.

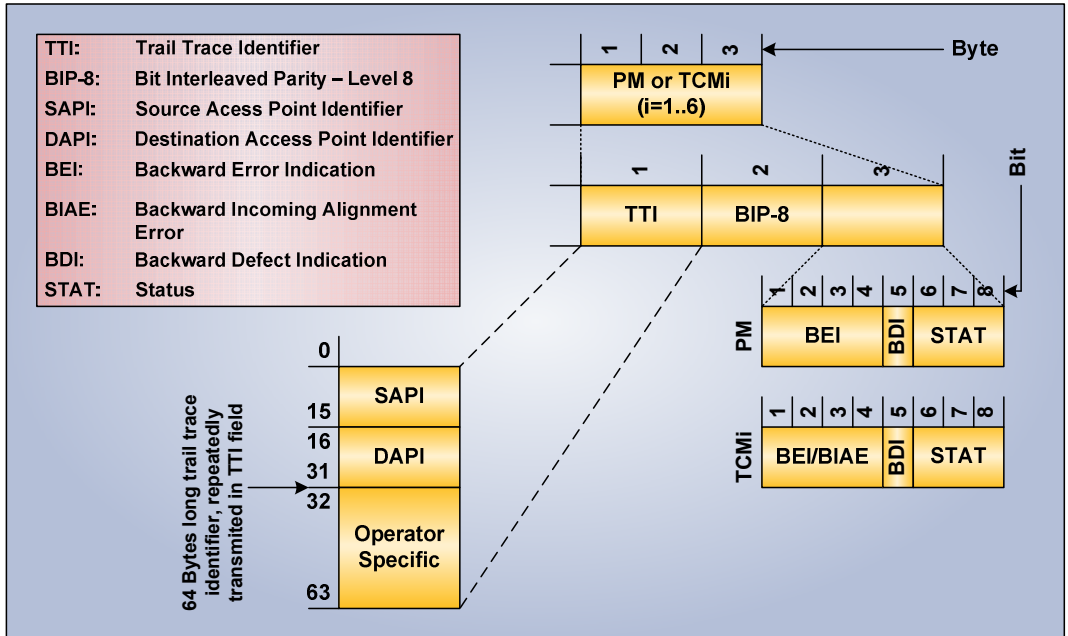


Figura 15 – Estrutura do campo PM e do campo TCM. Adaptado de [ITU01].

O campo STAT possui 3 bits e serve para indicar a presença de um sinal de manutenção. Sua composição obedece a Tabela 2.

Tabela 2 – Interpretação do campo STAT. Adaptado de [ITU01].

PM byte 3				Status
bits	6	7	8	
	0	0	0	Reserved for suture international standardization
	0	0	1	Normal path signal
	0	1	0	Reserved for suture international standardization
	0	1	1	Reserved for suture international standardization
	1	0	0	Reserved for suture international standardization
	1	0	1	Maintenance signal: ODUk-LCK
	1	1	0	Maintenance signal: ODUk-OCI
	1	1	1	Maintenance signal: ODUk-AIS

O campo *Fault Type & Fault Location Reporting Channel* (FTFL) é definido no byte 14 da segunda linha do multi-quadro OTN e possui uma informação de 256 bytes, alinhados ao MFAS, que serve para identificar o tipo de uma falha e em que operadora ela foi identificada. A informação do campo FTFL é subdividida em dois campos. São

eles, o *Forward Field* e o *Backward Field*, cada um com 128 bytes, ilustrado na Figura 16.

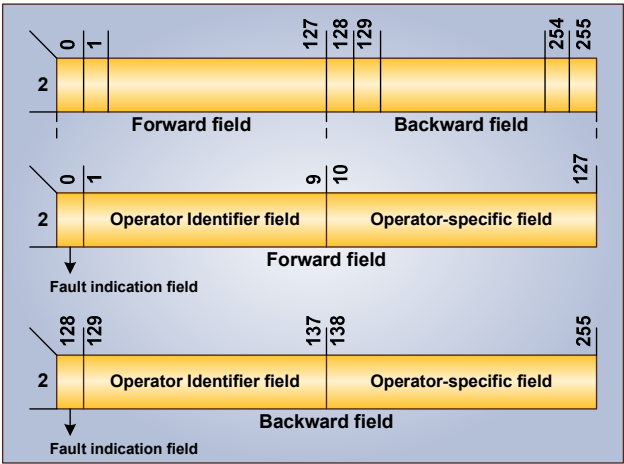


Figura 16 – Estrutura do campo FTF. Adaptado de [ITU01].

O Forward Field e o Backward Field por sua vez são subdivididos em três campos, são eles, *Fault Type Indication*, *Operator Identifier* e *Operator-specific*. O campo Fault Type Indication serve para informar o tipo de falha ocasionada, e é construído conforme a Tabela 3. O resto da informação é utilizado para identificar onde a falha foi identificada.

Tabela 3 – Interpretação do campo Fault Type Indication do FTF. Adaptado de [ITU01].

Fault indication code	Definition
0000 0000	No Fault
0000 0001	Signal Fail
0000 0010	Signal Degrade
0000 0011	Reserved for future international standardization
. . .	. . .
1111 1111	Reserved for future international standardization

## 2.8 Optical Channel Payload Unit Overhead (OPU OH)

O quarto e último cabeçalho refere-se ao *Optical Channel Payload Unit Overhead* (OPU OH) possui quatro campos, que são: PSI, JC, NJO e PJO, além de bytes reservados para futura padronização (RES). Esses campos possuem informações utilizadas para inserção e remoção dos dados do cliente no multi-quadro OTN, vide terminações na Figura 9.

O campo *Payload Structure Identifier* (PSI) é definido no byte 15 da quarta linha do multi-quadro OTN. Sua informação completa possui 256 bytes, os quais são alinhados ao MFAS. Na sua primeira posição (PSI[0]) está o sub-campo *Payload Type* (PT), as demais posições (PSI[1] a PSI[255]) são utilizadas, ou não, de acordo com o



mapeamento (inserção e remoção de carga útil) e processo de concatenação empregado. A Figura 17 ilustra detalhadamente o campo PSI.

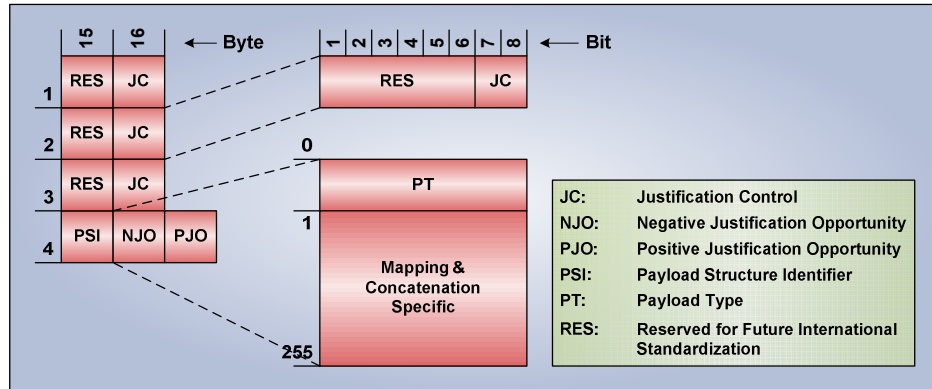


Figura 17 – Estrutura do OPU OH. Adaptado de [ITU01].

O byte PT define o tipo de sinal inserido na carga útil do OPU, definido de acordo com a Tabela 4. Será utilizado neste trabalho código de uso proprietário (80-8F).

Tabela 4 – Interpretação do campo PT. Adaptado de [ITU01].

MSB				LSB				HEX	Interpretation
1	2	3	4	5	6	7	8		
0	0	0	0	0	0	0	1	01	Experimental mapping
0	0	0	0	0	0	1	0	02	Asynchronous CBR mapping
0	0	0	0	0	0	1	1	03	Bit synchronous CBR mapping
0	0	0	0	0	1	0	0	04	ATM mapping
0	0	0	0	0	1	0	1	05	GFP mapping
0	0	0	0	0	1	1	0	06	Virtual Concatenated signal
0	0	0	1	0	0	0	0	10	Bit stream with octet timing mapping
0	0	0	1	0	0	0	1	11	Bit stream without octet timing mapping
0	0	1	0	0	0	0	0	20	ODU multiplex structure
0	1	0	1	0	1	0	1	55	Not available
0	1	1	0	0	1	1	0	66	Not available
1	0	0	0	x	x	x	x	80-8F	Reserved codes for proprietary use
1	1	1	1	1	1	0	1	FD	NULL test signal mapping
1	1	1	1	1	1	1	0	FE	PRBS test signal mapping
1	1	1	1	1	1	1	1	FF	Not available

Os campos de *Justification Control* (JC) estão presentes na coluna 16 das linhas 1 a 3 do multi-quadro, bits 7 e 8, conforme Figura 17. No caso de haver *jitter* no sinal do cliente, esse fator deve ser levado em conta pelo mapeamento (inserção de dados do cliente na carga útil do quadro OTN). O campo JC, do quadro OTN correspondente, deve ser preenchido com a informação de que houve variação, ou não, e se houve para mais ou para menos. O voto majoritário dos três campos define se será feita justificativa no quarto quadro do multi-quadro, utilizando-se os campos *Negative Justification*

*Opportunity* (NJO) ou *Positive Justification Opportunity* (PJO), visualizados na Figura 17, quando necessários, preenchidos com bytes de dados do cliente ou noutro caso preenchidos com zeros.

## 2.9 Carga Útil

Carga útil (*payload*) é a área do multi-quadro OTN onde é transportado o sinal do cliente. Está definida entre as colunas 17 e 3824 do multi-quadro OTN, totalizando 15232 bytes, sem a utilização de justificativa.

## 2.10 Forward Error Correction – FEC

O *Forward Error Correction* (FEC) utiliza o método de geração de código de correção de erros *Reed-Solomon* (RS) para produzir informação redundante que é transmitida com o quadro OTN e utilizado na recepção para localizar e corrigir erros que porventura venham a acontecer durante a transmissão [SIL01].

O ganho gerado pela utilização de correção de erros FEC pode ser de até 6.2 dB, ou seja, devido ao menor número de erros na comunicação é possível transmitir um sinal a certa taxa BER (*Bit Error Rate*) utilizando 6.2 dB a menos de potência. Tal ganho permite que seja utilizada uma extensão de fibra óptica de maior comprimento. Possibilita, também, a utilização de um maior número de canais em um sistema DWDM e, o mais importante, possibilita a evolução de enlaces ponto a ponto para redes ópticas ao diminuir a necessidade de regeneração do sinal no decorrer do caminho [PAI01].

## 2.11 Scrambling

Para que seja evitada uma sequência muito longa de “0”s ou “1”s, o que dificulta a regeneração do clock na recepção do sinal, é executado um processo de embaralhamento dos bits do multi-quadro. Esse processo é denominado *scrambling* e funciona como um *Linear Feedback Shift Register* (LFSR), de polinômio gerador  $1 + x + x^3 + x^{12} + x^{16}$ , onde sua saída é somada a cada bit do multi-quadro e forma o sinal embaralhado que será enviado, Figura 18.

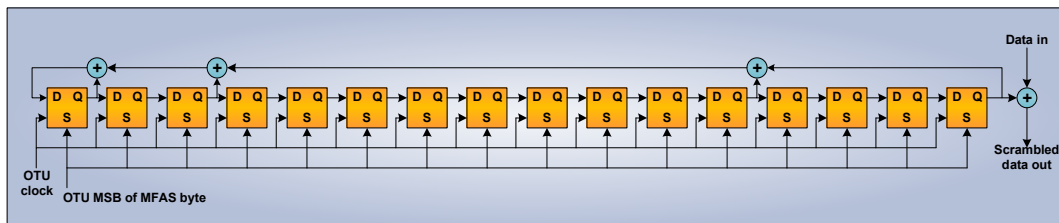


Figura 18 – Processo de scrambling. Adaptado de [ITU01].

O scrambling é efetuado após o cálculo do FEC e todos os bytes do multi-quadro devem ser embaralhados, com exceção dos bytes do FAS. Esse processo de embaralhamento é simétrico, ou seja, o mesmo processo utilizado para embaralhar o sinal para a transmissão é feito durante a recepção para que se obtenha o sinal original, desembaralhado.

## 2.12 Mapeamentos

A demanda por uma tecnologia capaz de transportar 10 Gigabit Ethernet LAN PHY inteiramente, limitação inerente ao SONET [GEE01], faz deste mapeamento o mais relevante atualmente para a indústria de telecomunicações. Além desse, OTN abrange muitos outros tipos de mapeamentos, sejam eles orientados a pacotes ou *células*, *síncronos* ou *assíncronos*. Outros mapeamentos utilizados são SONET/SDH, ATM e GFP.

A recomendação G.709 define três tipos de mapeamentos *Constant Bit Rate* (CBR), são eles, CBR2G5, CBR10G e CBR40G, referentes às taxas de transmissão aproximadas de 2.5Gbps, 10Gbps e 40Gbps respectivamente. Esses valores são derivados das taxas padronizadas no SONET/SDH e a relação de ocupação do OPU. Essa relação varia de acordo com o mapeamento e significa quanto o sinal do cliente ocupa da área de carga útil do quadro OTN. A Tabela 5 apresenta a correlação entre os mapeamentos CBR, interfaces SONET/SDH e as respectivas taxas de transmissão.

**Tabela 5 – Correlação entre os mapeamentos CBR, interfaces SONET/SDH e as respectivas taxas de transmissão.**

Interface/Mapeamento/Taxa			Interfaces Correspondentes		Taxas de transmissão do cliente em Gbps
<b>OTU<sub>k</sub></b>	OTN(CBR)	(Gbps)	SONET	SDH	
<b>OTU<sub>1</sub></b>	CBR2G5	2.666	OC-48	STM-16	2.488
<b>OTU<sub>2</sub></b>	CBR10G	10.709	OC-192	STM-64	9.953
<b>OTU<sub>3</sub></b>	CBR40G	43.018	OC-768	STM-256	39.813

A Figura 19 apresenta a estrutura do mapeamento de um sinal CBR2G5 em OPU<sub>1</sub>. Já a Figura 20 e a Figura 21 demonstram a estrutura do mapeamento de um sinal CBR10G em OPU<sub>2</sub> e de um sinal CBR40G em OPU<sub>3</sub>, respectivamente.

Row	Column (Byte)			3824	
	15	16	17		
1	RES	JC			3808D
2	RES	JC			3808D
3	RES	JC			3808D
4	PSI	NJO	PJO	3807D	

D:	Data Bytes	PSI:	Payload Structure Identifier
JC:	Justification Control	RES:	Reserved for Future International Standardization
NJO:	Negative Justification Opportunity		
PJO:	Positive Justification Opportunity		

Figura 19 – Estrutura do mapeamento de um sinal CBR2G5 em OPU<sub>1</sub>. Adaptado de [ITU01].

Os espaços não utilizados da área de carga útil do multi-quadro OTN são preenchidos com bytes de preenchimento (*Fixed Stuff* - FS), definidos na recomendação G.709, que são desconsiderados como informação a ser extraída para envio ao cliente. Esses bytes são utilizados para adaptação do sinal do cliente dentro do quadro OTN. A Figura 20 e a Figura 21 apresentam a disposição dos bytes de preenchimento para mapeamento de um sinal CBR10G em OPU<sub>2</sub> e de um sinal CBR40G em OPU<sub>3</sub>, respectivamente.

Row	Column (Byte)			1904	1905	1920	1921	3824
	15	16	17					
1	RES	JC		1888D		16FS		1904D
2	RES	JC		1888D		16FS		1904D
3	RES	JC		1888D		16FS		1904D
4	PSI	NJO	PJO	1887D		16FS		1904D

D: Data Bytes

FS: Fixed Stuff Bytes

JC: Justification Control

NJO: Negative Justification Opportunity

PJO: Positive Justification Opportunity

PSI: Payload Structure Identifier

RES: Reserved for Future International Standardization

Figura 20 – Estrutura do mapeamento de um sinal CBR10G em OPU<sub>2</sub>. Adaptado de [ITU01].

Row	Column (Byte)				1264	1265	1280	1281	2544	2545	2560	2561	3824
	15	16	17										
1	RES	JC		1248D	16FS		1264D		16FS		1264D		
2	RES	JC		1248D	16FS		1264D		16FS		1264D		
3	RES	JC		1248D	16FS		1264D		16FS		1264D		
4	PSI	NJO	PJO	1247D	16FS		1264D		16FS		1264D		

**D:** Data Bytes

**FS:** Fixed Stuff Bytes

**JC:** Justification Control

**NJO:** Negative Justification Opportunity

**PJO:** Positive Justification Opportunity

**PSI:** Payload Structure Identifier

**RES:** Reserved for Future International Standardization

Existe também a possibilidade de mapear múltiplos sinais concorrentemente, alocando espaços *tributários* para cada cliente dentro do quadro. Quatro ODU<sub>1</sub> mapeados assincronamente no *Optical Channel Data Tributary Unit* 1 inserido no 2 (ODTU<sub>12</sub>) que é multiplexado no tempo num ODTUG<sub>2</sub> (*Optical Channel Data Tributary Unit Group*) formando um OPU2 é uma combinação possível, apresentada na Figura 22.

O suplemento 43 [ITU03] contém recomendações para mapeamentos não definidos no G.709. Este trabalho é desenvolvido utilizando-se o mapeamento de 10GbE LAN PHY em uma estrutura derivada do CBR2G5 com taxas de transmissão aproximadas do CBR10G, adaptadas para o 10GbE, denominada OPU<sub>1e</sub>, apresentado no Capítulo 4.

### 3 10 Gigabit Ethernet

Para acomodar o notável crescimento do tráfego de dados, interfaces 10 Gbps se fazem necessárias. Como consequência disso, o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) fundou o grupo de estudos 802.3ae para desenvolver o padrão 10 Gigabit Ethernet (cuja análise funcional está fora do escopo deste trabalho). O 10 Gigabit Ethernet é a evolução da tecnologia Ethernet para a taxa de transmissão de 10 Gbps. Com o desenvolvimento do Gigabit Ethernet há alguns anos atrás, se disponibilizou interfaces de baixo custo com taxa de transmissão de 1 Gbps. Comparado com interfaces de alto custo como o Asynchronous Transfer Mode (ATM) e Packet over SONET/SDH (POS), o Gigabit Ethernet forneceu uma solução, com uma melhor relação custo *versus* benefício, para a construção de conexões Gigabit ponto-a-ponto [TOM01].

Segundo previsão, apresentada na Figura 23, baseada em informações das empresas Intel e Broadcom, existe uma janela de transição da maciça utilização da tecnologia GbE para a tecnologia 10GbE, em servidores x86, de aproximadamente 10 anos. Portanto, é possível afirmar que a partir de 2012 a tecnologia 10GbE será predominantemente utilizada como conexão Ethernet, no mercado de servidores x86. Porém as janelas de transições de 10GbE para 40GbE e de 40GbE para 100GbE têm previsão de apenas 5 anos, entre cada uma. Esse dado serve para justificar a motivação para o desenvolvimento do presente trabalho. Pois, a partir das previsões apresentadas pode-se fazer uma análise de *time to market*.

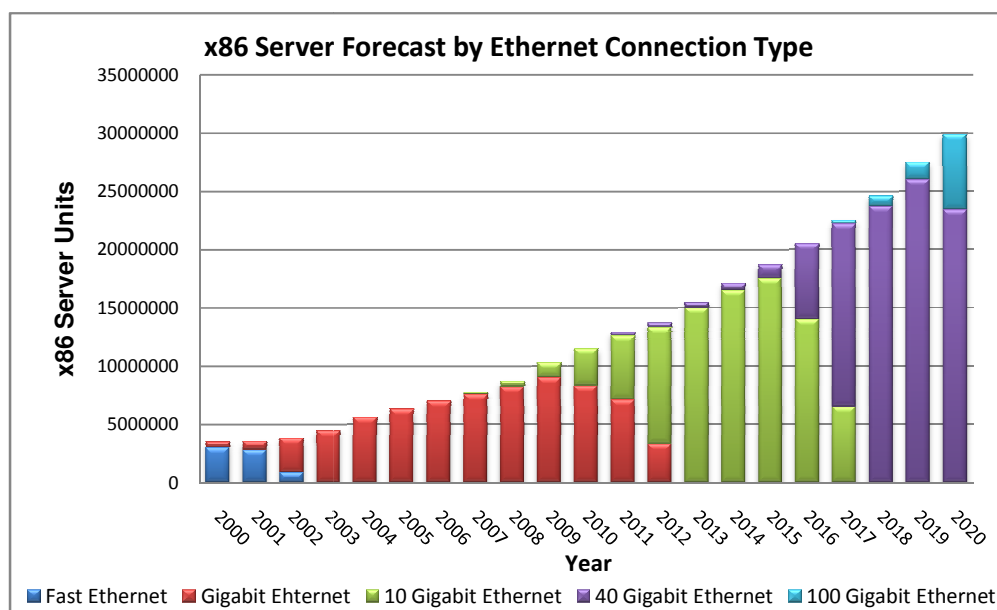


Figura 23 – Previsão de servidores x86 em relação ao tipo de conexão Ethernet. Adaptado de [HAY01].

## 4 Mapeamento 10GbE LAN PHY em OPU<sub>1e</sub>

O projeto X10GIGA tem em suas especificações os mapeamentos que o *transponder* terá que atender. O desenvolvimento de vários mapeamentos, concomitantemente, seria inviável, na medida em que aumentaria muito o tempo de projeto devido à complexidade implicada. A escolha do primeiro mapeamento a ser implementado provém da necessidade mais imediata que o equipamento deverá suprir. De acordo com a especificação do trabalho em desenvolvimento no escopo do projeto X10GIGA foi definida uma lista de prioridades, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Mapeamentos a serem implementados de acordo com a sua prioridade dentro do projeto.

Mapeamentos	
1°	10GbE BASE-R LAN PHY
2°	SDH/STM-64
3°	10GbE BASE-W WAN PHY
⋮	⋮

A recomendação G.709 utiliza SONET/SDH como referência de sinais de cliente para explicar os mapeamentos em CBR. No suplemento 43 [ITU03] da norma encontram-se diversas abordagens sobre o transporte de 10GbE LAN PHY sobre OTN, incluindo o mapeamento utilizado no escopo desse trabalho. Nesse documento são apresentados duas possíveis adaptações do quadro para o mapeamento do sinal do cliente. A primeira delas utiliza-se de bytes de preenchimento (FS) para acomodar o sinal do cliente dentro do OPU<sub>2</sub>, enquanto a segunda utiliza toda a área de carga útil, e por isso é dita como mapeada em OPU<sub>1</sub>. Porém, as duas têm taxas de transmissão diferentes das *nominais*, padronizadas na G.709, devido à origem do sinal do cliente ser 10 Gigabit Ethernet e não SONET/SDH. Por isso, as estruturas lógicas do quadro OTN, para mapeamento de 10GbE, são referenciadas como OPU<sub>k</sub>e, ODU<sub>k</sub>e e OTU<sub>k</sub>e, onde o “e” indica que há diferença de frequência entre eles e as taxas nominais de “k” definidas na recomendação G.709.

O mapeamento 10GbE LAN PHY em OPU<sub>1e</sub> traz outras peculiaridades. Além da taxa de transmissão não ser padronizada, existe a ausência de bytes de preenchimento (FS), o que faz necessário o desenvolvimento de soluções que se adaptem às especificações do padrão OTN e às restrições em relação ao sinal do cliente, como a tolerância na variação do *clock*. O controle dessa tolerância é uma das atividades propostas nesse trabalho.

## 4.1 Taxas de Transmissão

O projeto do presente trabalho envolve o uso e o entendimento de várias frequências e taxas de transmissão, sendo que as principais serão explanadas nesta seção.

Existem dois grandes grupos de interfaces físicas 10GbE, diferenciadas principalmente pela rede em que ela é empregada, LAN ou WAN. Os dois tipos de porta 10GbE recebem uma codificação de linha 64B/66B [BAR01], onde são adicionados dois bits de redundância para evitar transmissões inválidas e efetuar ajuste de sincronismo [WIK01][WAL01]. A taxa de transmissão efetiva é 10.3125Gbps, e não 10Gbps, devido a codificação. Por isso, a tecnologia SONET, utilizada nas redes de longas distâncias (WAN), empacota os dados com codificação de linha 64B/66B e os concatena em quadros STS-192c, para alcançar a sua taxa de operação, que é 9.953Gbps, ou seja, não consegue transportar inteiramente o sinal. Nas redes locais (LAN), o sinal da porta 10GbE LAN PHY é empacotado totalmente em OPU<sub>1e</sub>, pois considera a taxa efetiva. Outras taxas de transmissão importantes vão aparecendo de acordo com a pilha do padrão OTN, conforme a inserção de sobrecarga a cada nível, como mostra a Figura 24.

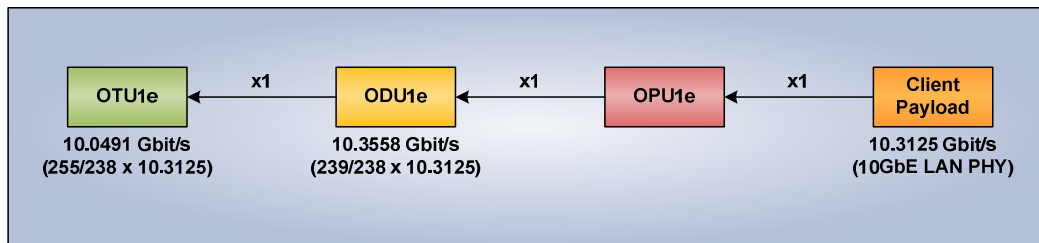


Figura 24 – Estrutura de mapeamento sem bytes de preenchimento. Adaptado de [ITU03].

A relação entre as taxas de transmissão, de acordo com a sobrecarga referente às estruturas lógicas do quadro OTN, é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 – Relação entre as taxas de transmissão de acordo com a sobrecarga referente às estruturas lógicas do quadro OTN.

Estruturas	Taxas (Gbps) <sup>1</sup>	Relações
<b>OPU<sub>1e</sub></b>	10.3125	10.0000 (10GbE) x 66B/64B
<b>ODU<sub>1e</sub></b>	10.3558	10.3125 (OPU <sub>1e</sub> ) x 239/238
<b>OTU<sub>1e</sub></b>	11.0491	10.3125 (OPU <sub>1e</sub> ) x 255/238

A tolerância de variação é um dado relevante que acompanha a informação das taxas de transmissão. O esquema de controle de justificativa apresentado no Capítulo 2.8 é capaz de compensar um pouco mais do que  $\pm 65$  ppm (partes por milhão) de diferença entre as taxas de transmissão do OTU e do cliente. A recomendação assume

<sup>1</sup> Valores arredondados a partir dos cálculos referentes à coluna “Relações”.



que a variação do OTU é de  $\pm 20$  ppm, sendo assim, permite sinais de clientes com tolerância de até  $\pm 45$  ppm. Esse esquema pode ser utilizado para SONET e SDH que tem tolerância de  $\pm 20$  ppm. Porém, clientes 10GbE LAN PHY tem tolerância de  $\pm 100$  ppm, o que possibilita diferenças superiores a capacidade de compensação da técnica de justificativa.

No Apêndice I, da recomendação G.709 [ITU01], é descrito como calcular os valores de tolerância das taxas de transmissão de acordo com o esquema de justificativa. Utilizando os exemplos da referência é possível encontrar o quanto de justificativa é necessário para absorver a tolerância de  $\pm 100$  ppm, especificada no mapeamento de sinais 10GbE LAN PHY. Antes de iniciar os cálculos é preciso definir equações e o significado de suas variáveis conforme é feito na Tabela 8.

**Tabela 8 – Definição de variáveis. Apêndice I [ITU01].**

<b><math>N</math></b>	= number of fixed stuff bytes in the OPUk payload area associated with the client in question (note that this is not the total number of fixed stuff bytes if multiple clients are being multiplexed)
<b><math>S</math></b>	= nominal STM-N or ODUj client rate (bytes/s)
<b><math>T</math></b>	= nominal ODUk frame period(s)
<b><math>y_c</math></b>	= client frequency offset (fraction)
<b><math>y_s</math></b>	= server frequency offset (fraction)
<b><math>p</math></b>	= fraction of OPUk payload area available to this client
<b><math>N_f</math></b>	= average number of client bytes mapped into an ODUk frame, for the particular frequency offsets (averaged over a large number of frames)

A média de bytes do cliente mapeados dentro do ODU é calculada pela equação (1) e pode ser simplificada na equação (2), dado que as frequências de ajuste são muito menores que 1.

$$N_f = S \cdot T \cdot \frac{(1+y_c)}{(1+y_s)} \quad (1)$$

$$N_f = S \cdot T \cdot (1 + y_c - y_s) \equiv S \cdot T \cdot \beta \quad (2)$$

O valor de  $\beta - 1$  representa a diferença bruta entre as variações do cliente e do OTU.

O valor de  $N_f$  também pode ser calculado pelo número total de bytes de dados do cliente dentro do ODU ( $4 \cdot 3808 \cdot p = 15232 \cdot p$ ), menos o número de bytes de preenchimento fixo ( $N$ ) para este mapeamento, mais a média do número de bytes fixos desse cliente após muitos quadros. Considerando a taxa em que ocorre justificativa (valor representado pela variável  $\alpha$ ). A combinação dessa equação com a aproximação da equação (2) resulta em:

$$S \cdot T \cdot \beta = \alpha \cdot p + 15232 \cdot p - N \quad (3)$$

A taxa nominal do cliente utilizada nesse trabalho é de 10,3125 Gbps, que serve para encontrar o valor de  $S$ , como mostra a equação (4).

$$S = \frac{10.3125 \cdot 10^9}{8 \text{ bits}} = 1289062500 \text{ bytes/s} \quad (4)$$

O período nominal de transporte do quadro ODU<sub>1</sub>e ( $T$ ), em bytes, é calculado na equação (5).

$$T = \frac{(4 \cdot 3824) \cdot 8 \text{ bits}}{10.3558 \cdot 10^9} = 1,18163 \cdot 10^{-5} \quad (5)$$

Tendo que o mapeamento de 10GbE LAN PHY em uma estrutura CBR2G5 não tem bytes fixos ( $N = 0$ ) e que nesse trabalho utiliza-se o mapeamento de um único cliente, ou seja, a área de carga útil é utilizada totalmente ( $p = 1$ ), podemos resolver a equação (3) da seguinte maneira:

$$15232 \cdot \beta = \alpha + 15232 \quad (6)$$

$$\alpha = 15232 \cdot (\beta - 1) \quad (7)$$

Considerando as taxas de variação como mostra a Tabela 9, podemos encontrar os valores de  $\alpha$  para os dois casos de maior diferença.

**Tabela 9 – Valores utilizados para encontrar  $\alpha$ .**

Caso	Cliente ( $y_c$ )	OTU ( $y_s$ )	Total ( $\beta - 1$ )	$\alpha$
1	-100ppm	+20ppm	-120ppm	-1,8278
2	+100ppm	-20ppm	+120ppm	+1,8278

$$-1,8278 \leq \alpha \leq +1,8278 \quad (8)$$

O intervalo de  $\alpha$ , equação (8), mostra que nesse mapeamento a taxa de ocorrência de justificativa ultrapassa o suportado. Pela técnica de controle de justificativa, descrita na norma,  $\alpha$  deve no máximo chegar ao módulo de um ( $\alpha \leq |1|$ ), onde  $\alpha = |1|$  corresponde à utilização dos campos de PJO ou NJO em todos os quadros, e  $\alpha = 0$  seria o caso em que os campos de justificativa não são necessários, ou seja, nominal. Outra forma de explicar esses valores seria afirmar que para atender esses piores casos se faz necessário mais um campo de justificativa positiva e outro de negativa.

A norma não aborda este tipo de mapeamento e por isso não apresenta referência para solução que atenda essa tolerância.

## 5 Cronograma de Atividades

A Tabela 10 apresenta o cronograma proposto para realização das atividades deste trabalho de conclusão de curso. As tarefas estão ordenadas e discutidas na sequência.

**Tabela 10 – Cronograma de Atividades.**

Tarefa	Agosto				Setembro				Outubro				Novembro				Dez	
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
1 Escrita da proposta																		
2 Estudo das taxas, mapeamentos e cabeçalhos																		
3 Desenvolvimento das filas do extrator																		
4 Desenvolvimento do controle de jitter																		
5 Desenvolvimento do controle de justificativa																		
6 Desenvolvimento do insersor de carga útil																		
7 Inserção de justificativa e cabeçalhos na transmissão																		
8 Teste dos módulos																		
9 Teste do sistema integrado																		
10 Escrita do volume final do TC																		
11 Apresentação do TC																		

### Atividade 1 – Escrita da proposta

- Escrita da presente proposta de trabalho de conclusão de curso.

### Atividade 2 – Estudo das taxas, mapeamentos e cabeçalhos

- Nesta atividade busca-se obter conhecimento suficiente para realizar o trabalho proposto, com soluções que atendam às especificações do projeto X10GIGA para desenvolvimento dos módulos.

### Atividade 3 – Desenvolvimento das filas do extrator

- As filas de extração de carga útil têm como principal objetivo manter a comunicação com o cliente, ininterrupta, respeitando a taxa de transmissão e sua variação, definidas para o mapeamento utilizado.
- Controle da ocupação da fila e geração de informação, para tomada de decisões sobre as frequências de leitura e escrita, são as principais funções que esse módulo deve exercer.

#### **Atividade 4 – Desenvolvimento do controle de jitter**

- Essa atividade consiste no estudo e na implementação de uma solução para o controle da defasagem entre o sinal do cliente e do OTU para o mapeamento empregado.
- O módulo a ser desenvolvido nessa atividade deve ser capaz de detectar as variações das taxas de transmissão e atuar de forma que a defasagem não ultrapasse a tolerância determinada pela escolha do mapeamento.

#### **Atividade 5 – Desenvolvimento do controle de justificativa**

- Detectar, interpretar e tratar, os sinais de justificativa, são as ações que deverão estar presentes no módulo a ser desenvolvido nesta atividade.
- A técnica de controle de justificativa, apresentada na recomendação G.709, é a principal função do módulo dessa atividade, que basicamente precisa contar os votos de justificativa, e depois proceder de acordo com o resultado.

#### **Atividade 6 – Desenvolvimento do módulo de inserção de carga útil**

- Esta atividade consiste no desenvolvimento do módulo de inserção de carga útil dentro do quadro OTN, especificamente na área do OPU, respeitando as peculiaridades do mapeamento específico.
- Os dados do cliente, armazenados na fila, devem ser inseridos na área de carga útil para serem transmitidos no quadro OTN.

#### **Atividade 7 – Inserção de justificativa e cabeçalhos na transmissão**

- O objetivo desta atividade é basicamente montar o quadro OTN, considerando a presença da justificativa para isso.
- Informações de transporte (OTU OH), comunicação (ODU OH) e tipo de dado do cliente (OPU OH), formam o grupo de campos que o módulo dessa atividade deve preencher, além de inserir os elementos referentes à técnica de justificativa.

#### **Atividade 8 – Teste dos módulos**

- A verificação da funcionalidade lógica dos módulos criados, encontra-se presente em todas as atividades de desenvolvimento, porém deve ser tratada como uma tarefa a parte, por ter outro objetivo, que não é a descrição de *hardware*.
- Especificadas todas as funções, testar os módulos para garantir que os mesmos as realizam como esperado, é o principal objetivo dessa atividade.

#### **Atividade 9 – Teste do sistema integrado**

- Integração dos módulos desenvolvidos com o projeto X10GIGA, para posterior prototipação em FPGA.
- Verificar o funcionamento do sistema integrado com os módulos desenvolvidos. Realização de testes, inicialmente simulações, que possibilitem confirmar que todas as especificações são atendidas, e finalmente fazer a validação em FPGA.

**Atividade 10 —Escrita do volume final do TC**

- Escrita do volume final do trabalho de conclusão de curso para ser entregue aos avaliadores dentro do prazo estabelecido.
- Descrever os resultados obtidos e os métodos utilizados para realização desse trabalho.

**Atividade 11 —Apresentação do TC**

- Apresentação oral das atividades desenvolvidas durante a realização do trabalho de conclusão de curso para a banca avaliadora.
- Atividade final, correspondendo à última avaliação a ser realizada sobre esse trabalho.

## **6 Recursos Necessários**

---

Todos os recursos necessários para o desenvolvimento desse trabalho estão presentes no GAPH e na PUCRS.

### **6.1 Recursos de Hardware**

- Dois computadores de configuração igual ou superior a:
  - Processador: Intel Core 2 Duo E6600;
  - 2GB de memória RAM;
- Estação de trabalho;
- Osciloscópio;
- Plataforma de prototipação Xilinx ML505 com um FPGA Virtex-5.

### **6.2 Recursos de Software**

- Sistema operacional Windows XP;
- Sistema operacional Linux;
- Modelsim Se 6.1f (ou versão superior);
- ISE 9.2i (ou versão superior);
- ChipScope Pro 9.2i (ou versão superior).

### **6.3 Fontes de Pesquisa**

- Biblioteca Central Irmão José Otão;
- Internet (acesso ao portal de periódicos CAPES).

## 7 Referências

---

- [ALE01] Alexander, S. “OTN offers transparent service delivery”. Capturado em: <http://www.networkworld.com/news/tech/2006/020606-techupdate.html#graphic>, Ago 2008.
- [BAR01] Barbieri, A., “10 Gigabit Ethernet and It’s “X” Factors”. Capturado em: [http://www.cisco.com/asiapac/campaigns/metroethernet/files/10ge\\_po\\_pack\\_mag\\_arti.pdf](http://www.cisco.com/asiapac/campaigns/metroethernet/files/10ge_po_pack_mag_arti.pdf), Ago 2008.
- [CIE01] Ciena Corporation “The Value of OTN for Network Convergence and IP/Ethernet Migration”. White Paper, Oct 2005.
- [DIG01] Dígitro – Tecnologia sem limites “Glossário Tecnológico”. Capturado em: [http://www.digitro.com/pt/tecnologia\\_glossario-tecnologico.php](http://www.digitro.com/pt/tecnologia_glossario-tecnologico.php), Ago 2008.
- [FIL01] Filho, C. “Material didático – Comunicação Digital I”, Cap. 6 – Multiplexação. Escola Politécnica de Pernambuco, UPE. Capturado em: <http://carmelofilho.googlepages.com/Cap6multiplexacao.pdf>, Ago 2008.
- [GEE01] Gee, N., Basch, B., Gringeri S. “10G LAN PHY over G.709 OTN: A Service Provider Prospective”. OFC/NFOEC, Feb 2008.
- [GUE01] Guedes, B. “Análise do desempenho de redes ópticas de topologia manhattan street com roteamento por deflexão de pacotes”. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PUCRJ, Cap. 1, Abril 2005.
- [HAY01] Hays, R. and Frasier, H. “40G Ethernet Market Potential”. Capturado em: [http://www.ieee802.org/3/hssg/public/apr07/hays\\_01\\_0407.pdf](http://www.ieee802.org/3/hssg/public/apr07/hays_01_0407.pdf). IEEE 802.3 HSSG Interim Meeting, Apr 2007.
- [ITU01] ITU-T. “Interfaces for the Optical Transport Network (OTN)”. ITU-T Recommendation G.709/Y.1331, Mar 2003.
- [ITU02] ITU-T. “The Control of Jitter and Wander within the Optical Transport Network (OTN)”. ITU-T Recommendation G.8251, Nov 2001.
- [ITU03] ITU-T. “Transport of IEEE 10G Base-R in Optical Transport Networks (OTN)”. ITU-T Series G – Supplement 43, Feb 2008.
- [KOC01] Kocalski, C. and Harwood, J., “A Primer on Digital Wrappers for Optical Transport Networks”. Vesta Corporation, 2000.
- [NAK01] Nakamura, R. “Novas Tecnologias de Comunicações Ópticas”. Capturado em: [http://www.rnp.br/\\_arquivo/sci/2005/nakamura-roberto\\_novas-tecnologias.pdf](http://www.rnp.br/_arquivo/sci/2005/nakamura-roberto_novas-tecnologias.pdf), Ago 2008.
- [PAI01] Paiva, R. e Marczak, S. “Desenvolvimento de Módulos de Hardware para Recepção e Transmissão de Quadros OTN”. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Computação, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, PUCRS, Dez 2007.
- [SIL01] Silva, S. e Rodolfo, T. “Implementação de uma arquitetura Reed-Solomon para uso em Redes OTN 10.7 Gbps”. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Computação, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, PUCRS, Dez 2007.
- [TOM01] Tomsu, P. “Next Generation Optical Networks”. Prentice Hall PTR, 2002.

- [TRO01] Tronco, T. “Redes de Nova Geração – A Arquitetura de Convergência do IP, Telefonia e Redes Ópticas”. Editora Érica, Cap. 7, 2006.
- [WAL01] Walker, R. e Dugan, R., “64b/66b low-overhead coding proposal for serial links”. Capturado em: [http://grouper.ieee.org/groups/802/3/10G\\_study/public/jan00/walker\\_1\\_0100 .pdf](http://grouper.ieee.org/groups/802/3/10G_study/public/jan00/walker_1_0100.pdf), Ago 2008.
- [WIK01] Wikipedia, The Free Encyclopedia “64B/66B encoding”. Capturado em: [http://en.wikipedia.org/wiki/64b/66b\\_encoding](http://en.wikipedia.org/wiki/64b/66b_encoding), Ago 2008.
- [WIK02] Wikipedia, The Free Encyclopedia “Payload”. Capturado em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Payload>, Ago 2008.
- [WIK03] Wikipedia, The Free Encyclopedia “Ethernet”. Capturado em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Ethernet>, Ago 2008.
- [WIK04] Wikipedia, The Free Encyclopedia “Clock”. Capturado em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Clock>, Ago 2008.
- [WIK05] Wikipedia, The Free Encyclopedia “Paridade (telecomunicações)”. Capturado em: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Paridade\\_\(telecomunicações\)](http://pt.wikipedia.org/wiki/Paridade_(telecomunicações)), Ago 2008.
- [YOU01] YourDictionary.com – Online Dictionary “OTN (Optical Transport Network)”. Capturado em: <http://www.yourdictionary.com/otn>, Ago 2008.
- [ZHE01] Zheng, Y. “Networks for computer scientists and engineers”. Oxford University Press, 2002.