

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PROPOSTA PARA MINIMIZAR PENALIDADE DO TRÁFEGO DE MELHOR ESFORÇO (BE) EM REDES  
ÓTICAS PASSIVAS ETHERNET (EPON): ANÁLISE ATRAVÉS DE MODELO HÍBRIDO  
ANALÍTICO/SIMULADO.

AGENOR ANTONIO PRADO

DM 21 / 2011

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2011

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

AGENOR ANTONIO PRADO

PROPOSTA PARA MINIMIZAR PENALIDADE DO TRÁFEGO DE MELHOR ESFORÇO (BE) EM REDES  
ÓTICAS PASSIVAS ETHERNET (EPON): ANÁLISE ATRAVÉS DE MODELO HÍBRIDO  
ANALÍTICO/SIMULADO.

ORIENTADOR: PROF. DR. EDUARDO COELHO CERQUEIRA

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2011

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

AGENOR ANTONIO PRADO

PROPOSTA PARA MINIMIZAR PENALIDADE DO TRÁFEGO DE MELHOR ESFORÇO (BE) EM REDES  
ÓTICAS PASSIVAS ETHERNET (EPON): ANÁLISE ATRAVÉS DE MODELO HÍBRIDO  
ANALÍTICO/SIMULADO.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau Mestre em Engenharia Elétrica com ênfase em Computação Aplicada.

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2011

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PROPOSTA PARA MINIMIZAR PENALIDADE DO TRÁFEGO DE MELHOR ESFORÇO (BE) EM REDES  
ÓTICAS PASSIVAS ETHERNET (EPON): ANÁLISE ATRAVÉS DE MODELO HÍBRIDO  
ANALÍTICO/SIMULADO.

AUTOR: AGENOR ANTONIO PRADO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA  
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Eduardo Coelho Cerqueira  
(ORIENTADOR – UFPA - PPGEE)

---

Prof. Dr. Antônio Jorge Gomes Abelém  
(MEMBRO – UFPA - PPGCC)

---

Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês  
(MEMBRO – UFPA - PPGEE)

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2011

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Biblioteca Central/UFPA, Belém-PA**

---

Prado, Agenor Antonio

Proposta para minimizar penalidade do tráfego de melhor esforço (BE) em redes óticas passivas ethernet (EPON) : análise através de modelo híbrido analítico/simulado / Agenor Antonio Prado; orientador, Eduardo Coelho Cerqueira.\_ 2011.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2011.

1. Ethernet (Redes locais de computadores). 2. Redes óticas passivas. 3. Petri, Redes de I. Cerqueira, Eduardo Coelho, orient. II. Título.

CDD - 22. ed 004.68

---

Para minha Filha:  
Clara Kup Carvalho  
Prado

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus e aos espíritos iluminados pelo amparo ao longo de minha vida.

Ao professor Antônio Jorge Gomes Abelém, por anos de incentivo, apoio, e perseverança durante o desenvolvimento de toda a pesquisa que culminou com esta dissertação.

Ao professor Eduardo Cerqueira, pela orientação e apoio na reta final da elaboração deste trabalho.

Especialmente ao meu pai, Arnaldo Corrêa Prado Junior, e minha mulher, Edy Silva de Azevedo Carvalho Prado pelas constantes cobranças que me serviram de incentivo para chegar ao final desta jornada. Ao meu pai, ainda, pela ajuda na formatação, revisão dos textos e, evidentemente por toda educação transmitida ao longo de minha vida. A minha mulher pelo amor a mim dado e também a dedicação total a nossa filha Clara que permitiu meu empenho principalmente na reta final da escrita desta dissertação.

Ao professor Dr. Carlos Renato Lisboa Francês por ter aceitado participar da banca examinadora e também por ter despertado em mim, durante a disciplina Avaliação de Desempenho, o interesse por métodos e ferramentas que foram fundamentais para a elaboração do modelo desenvolvido neste trabalho.

A minha mãe Maria Elissa Kup que mesmo ausente fisicamente, está sempre presente espiritualmente.

Ao meu irmão, minha irmã, cunhada e sobrinhos que muito me trazem felicidade nas horas de lazer e recreação.

Aos meus sogros que também são fundamentais na estrutura familiar que me permite ter tranquilidade na vida particular.

A todos os membros do Grupo de Estudos em Redes de Computadores e Comunicação Multimídia (GERCOM) pelo apoio nas apresentações e incentivos, em especial ao Waldir Aranha Moreira pelo grande apoio na tradução dos artigos submetidos a eventos internacionais e à Decíola Fernandes de Souza pelo apoio não só técnico como pessoal dado à minha família.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará que contribuíram para este trabalho.

Aos professores, coordenadores e alunos das Faculdades Integradas Ipiranga pela força nos momentos difíceis deste trabalho.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 As redes de acesso .....	1
1.2 A relevância do tráfego de melhor esforço (BE) .....	6
1.3 Aspectos de Análise de Desempenho .....	8
1.4 Objetivos .....	11
1.5 Organização da dissertação .....	11
2. REDES ÓPTICAS PASSIVAS .....	13
2.1 Redes ópticas como solução para a redes de acesso .....	13
2.2 Componentes básicos de uma rede óptica passiva .....	16
2.3 Arquitetura de uma rede óptica passiva .....	19
2.4 Princípio de operação de uma rede óptica passiva .....	21
2.5 Padronização das redes óticas passivas .....	23
2.5.1 BPON / APON .....	24
2.5.2 GPON .....	25
2.5.3 EPON .....	26
2.6 Porque o padrão Ethernet? .....	28
2.7 Redes PON de próxima geração .....	30
3. ALOCAÇÃO DE LARGURA DE BANDA EM REDES ÓPTICAS PASSIVAS ETHERNET.....	32
3.1 O Protocolo de Controle Mutiponto (MPCP) .....	32
3.2 O IPACT .....	36
3.3 Classes de serviços .....	37
3.4 O IPACT modelado usando teoria de filas .....	39
4. PROPOSTA PARA MINIMIZAR A PENALIZAÇÃO DO TRÁFEGO DE MELHOR ESFORÇO (BE) .....	41
4.1 Trabalhos relacionados .....	41
4.2 O modelo em Rede de Petri .....	43
4.2.1 A FLEXIBILIDADE DO MODELO .....	47
4.2.2 VALIDAÇÃO DO MODELO .....	47
4.3 A penalização do BE no IPACT .....	49
4.4 Minimizando a penalização do BE .....	50
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	52
5.1. Cenários .....	52

5.2. Resultados .....	53
5.2.1 CENÁRIO 1 .....	53
5.2.2 CENÁRIO 2 .....	54
5.2.3 CENÁRIO 3 .....	55
5.3 Análise dos resultados .....	56
6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS .....	59
6.1 Conclusões gerais .....	59
6.2 Trabalhos futuros .....	60
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	62
ANEXO I - Modelagem da ONU em redes de Petri usando a ferramenta DaNAMICS ...	65

## LISTA DE ILUSRAÇÕES

Figura 1 - Redes de Acesso, Redes Metropolitanas e Backbones .....	2
Figura 2 - Fibra até o usuário final .....	17
Figura 3 - Esquema da ETS 300 681 da ETSI .....	19
Figura 4 - Topologias de PONs .....	20
Figura 5 - Tráfego Downstream em PONs .....	21
Figura 6 - Tráfego Upstream em PONs .....	22
Figura 7 - Tráfego Downstream em EPONs .....	27
Figura 8 - Tráfego Upstream em EPONs .....	28
Figura 9 - Esquema simplificado de uma WDM-PON .....	30
Figura 10 - Estrutura do Quadro MPCP .....	34
Figura 11 - Princípio de Funcionamento das mensagens GATE e REPORT .....	35
Figura 12 - Esquema GATE e REPORT no IPACT .....	36
Figura 13 - Modelo em Fila .....	39
Figura 14 - Modelo em Rede de Petri Estocástica Colorida .....	44
Figura 15 - Resultados da simulação com ênfase no tamanho da fila .....	45
Figura 16 - Reprodução parcial dos resultados obtidos por Al Zahr e Gagnaire .....	48
Figura 17 - Resultados obtidos neste trabalho com parâmetros idênticos aos de Al Zahr e Gagnaire .....	48
Figura 18 - Demonstração da penalidade do tráfego BE .....	49
Figura 19 - Desempenho do IPACT no cenário 1 .....	53
Figura 20 - Desempenho da proposta de melhoria do IPACT no cenário 1 .....	54
Figura 21- Desempenho do IPACT no cenário 2 .....	54
Figura 22 - Desempenho da proposta de melhoria do IPACT no cenário 2 .....	55
Figura 23 - Desempenho do IPACT no cenário 3 .....	55
Figura 24 - Desempenho da proposta de melhoria do IPACT no cenário 3 .....	56
Figura 25 – Ambiente de Trabalho do DaNAMICS .....	65
Figura 26 - Filas modeladas em Rede de Petri Colorida .....	66
Figura 27 - Configurando a Taxa_T1 .....	67
Figura 28 - Limitando o numero Máximo de quadros da fila da ONU .....	68
Figura 29 - Realizando as iterações .....	68
Figura 30 – Atingindo a estabilidade na simulação .....	69
Figura 31 – Resultado da simulação.....	69
Figura 32 – Achando o intervalo de confiança .....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Participação dos diversos tipos de tráfegos IP no mundo ao longo do ano de 2010 ....	7
Tabela 2 - Participação dos diversos tipos de tráfegos IP projetada para o ano de 2014 .....	7
Tabela 3- Penetração de F.O. em domicílios no mundo .....	15
Tabela 4 - Comparativo EPON x GPON .....	29
Tabela 5 - Tipo de Tráfego e Agrupamento em Filas .....	38
Tabela 6 - Resumo dos trabalhos aqui relacionados .....	43
Tabela 7 - Parâmetros do Modelo .....	47
Tabela 8 - Cargas de Tráfego nas ONUs .....	52
Tabela 9 - Comparativo de Utilização da ONU na qual o tráfego BE tem baixa penalização .....	57
Tabela 10 - Comparativo de aumento do atraso nas classes privilegiadas .....	57

## LISTA DE SIGLAS

ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AES	Advanced Encryption Standard
APON	ATM Passive Optical Networks
AF	Assured Forwarding
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BPON	Broadband Passive Optical Networks
BRI	Basic Rate Interface
BE	Best Effort
CATV	Cable TV
CEO	Chief Executive Officer
CoS	Class of Services
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
DA	Destination Address
DBA	Dynamic Bandwidth Allocation
DCS	Digital Cellular System
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
DSL	Digital Subscriber Line
EF	Expedited Forwarding
EFMA	Ethernet in the First Mile Alliance
EPON	Ethernet Passive Optical Networks
EPON-10G	Ethernet Passive Optical Networks – 10 Gbps
ETS	European Telecommunications Standards
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCS	Frame Check Sequence
FQSE	Fair Queueing with Service Envelopes
FSAN	The Full Service Access Network
FTP	File Transfer Protocol
FTTB	Fiber to the Building
FTTC	Fiber to the Curb
FTTH	Fiber to the Home
FWA	<a href="#">Fixed Wireless Access</a>
GFP	Generic Framing Procedure

GPON	Gigabit Passive Optical Networks
GPS	Generalized Processor Sharing
GSM	Global System for Mobile Communications
HFC	Hybrid Fiber Coax
HTTP	Hyper Text Transfers Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
IPACT	Interleaved Polling with Adapting Cycle Time
ISDN	Integrated Services Digital Network
ITU	International Telecommunications Union
ITU-T	ITU Telecommunication Standardization Sector
LLC	Logic Link Control
LMDS	Local Multipoint Distribution Service
MAC	Media Access Control
MAN	Metropolitan Area Networks
MMDS	Multichannel Multipoint Distribution Service
MPCP	Multi-Point Control Protocol
OAN	Optical Access Network
ODN	Optical Distribution Network
OLT	Optical Line Terminal
ONU	Optical Network Unit
P2P	Peer-to-Peer
PLC	Power Line Communications
P-MP	Point to Multipoint
PRI	Primary Rate Interface
PSLR	Proportional Sharing with Load Reservation
QoS	Quality of Service
RDSI	Rede Digital de Serviços Integrados
RF	Radio Frequency
RTT	Round Trip Time
SA	Source Address
SCPN	Stochastic Colored Petri Networks
SMATV	Satellite Master Antenna Television
SMTP	Share-based the Multiple Traffic Prediction
TDM	Time Division Multiplex

TDMA	Time Division Multiple Access
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
VoIP	Voice Over Internet Protocol
WAN	Wide Area Networks
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WFQ	Weighted Fair Queueing
WiMax	Worldwide Interoperability for Microwave Access
XG-PON	10Gbps GPON (ITU-T G.987)

# RESUMO

Neste trabalho, propõe-se uma melhoria na estratégia de escalonamento baseada em pesos das classes de tráfego em redes óticas passivas Ethernet – EPON, de modo a não penalizar demasiadamente a classe tipo melhor esforço (BE). Como suporte, desenvolveu-se um modelo híbrido analítico/simulado para análise de desempenho do fluxo de subida, baseado no atraso total de quadros. A modelagem foi feita utilizando Redes de Petri Coloridas Estocásticas (*Stochastic Colored Petri Nets* - SCPN) da qual se obtém, por simulação, o tamanho médio da fila que posteriormente é usado para, analiticamente, obter-se o atraso total.

Não obstante ao crescimento de aplicações multimídia em tempo real, no ano de 2010, o tráfego tradicional na Internet (navegação web, email, mensagens instantâneas) classificado como melhor esforço ainda foi responsável, sozinho (excluindo transferência de arquivos P2P), por valores em torno de 18% do tráfego na Internet. Somando-se a este percentual as aplicações P2P, que também não são essencialmente sensíveis ao atraso, têm-se uma participação de 58% (o tráfego P2P foi no ano de 2010 responsável por aproximadamente 40% do volume total de informações trafegadas na Internet). Mesmo em previsões feitas para o ano de 2014 o tráfego BE ainda representará aproximadamente 40% do volume total de dados a serem trafegados nas redes IPs mundiais. Estes números demonstram que a preocupação com este tipo de tráfego não pode ser relegada a uma importância secundária em detrimento às aplicações que exigem maior qualidade de serviço.

Tomando como base o escalonamento IPACT (*Interleaved Polling with Adapting Cycle Time*) esta dissertação demonstra que é possível, através da melhoria proposta, obter atrasos menores no tráfego de melhor esforço, sem que as classes de tráfego prioritárias ultrapassem as especificações de atraso recomendadas para cada uma destas.

**PALAVRAS CHAVE:** Redes Óticas Passivas Ethernet, Tráfego de Melhor Esforço, Classe de Serviço, Redes de Petri.

# Abstract

An improvement in the scheduling strategy based on weights of classes of traffic (CoS) is proposed in this work so as not to penalize too much the best-effort (BE) class type. As support, a hybrid analytical/simulated model to analyze the performance of upstream flows in Ethernet Optical Passive Networks (EPON) based on frame's total delay, was developed. The modeling was done using Stochastic Colored Petri Networks (SCP<sub>N</sub>), from where the average queue size is obtained. Then, this average is used to analytically obtain the total delay.

Besides the growth of multimedia real-time applications, the traditional traffic in the Internet (as web browser, email and instant messengers) is still, alone, responsible for 18% of the total traffic (excluding P2P traffic). Adding the P2P applications load, which traffic is also not sensible to delay, a 58% of participation is reached (only P2P traffic was responsible for 40% of the total traffic flowing thru the Internet in the year of 2010). Also in traffic's forecasts for 2014 the Best Effort (BE) traffic will be still responsible for 40% of the total load in IP networks in the world. This numbers shows that the cares with this kind of traffic cannot be put in low relevance while giving more resources to classes that requires more quality of services.

Having the scheduling strategy called IPACT (*Interleaved Polling with Adapting Cycle Time*) as a base, this work demonstrates, by the improvement proposed, that is possible to reach lowers delays in the best effort traffic, without making the upper priority classes reach delays over the parameters recommended for which one.

**KEYWORDS:** Ethernet Passive Optical Networks, best effort traffic, Class of Service, Petri Nets.

# 1

## INTRODUÇÃO

*Este capítulo apresenta a questão das redes de acesso e seus problemas relacionados às necessidades atuais da transmissão de dados. Em seguida detalha os objetivos deste trabalho e termina enfatizando como o trabalho está organizado.*

### 1.1 As Redes de Acesso

O tráfego nas redes de comunicações instaladas no mundo inteiro está crescendo significativamente. Segundo previsões da CISCO [CISCO, 2010] o tráfego IP (*Internet Protocol*) irá superar os  $\frac{3}{4}$  de Zetabyte (767 Exabytes) em 4 anos. Ainda, de acordo com a CISCO, Somente no ano de 2009 o crescimento deste tráfego foi de 45%. Nos anos recentes a espinha dorsal (*backbone*) das redes de comunicações tem apresentado um grande crescimento na capacidade de tráfego, todavia este aumento não tem sido acompanhado pelas redes de acesso.

A rede de acesso é a porção da rede mais próxima do usuário final (assinante). Esta ainda representa o gargalo entre as altas velocidades das redes locais e os *backbones* das empresas de telecomunicações. Pode-se ainda definir a rede de acesso como o conjunto de equipamentos e infraestrutura que permite a ligação adequada dos usuários à rede principal de modo a obter acesso a um conjunto de serviços com adequada qualidade e a um custo razoável.

Em um cenário de comunicação fim-a-fim pode-se, então, classificar as redes atuais em três grandes segmentos distintos: Redes de Acesso (*Access Network*), Rede

Metropolitanas (*Metropolitan Area Networks – MANs*) e *Backbones* (ainda classificados como *Wide Area Networks – WANs*) (Figura 1)

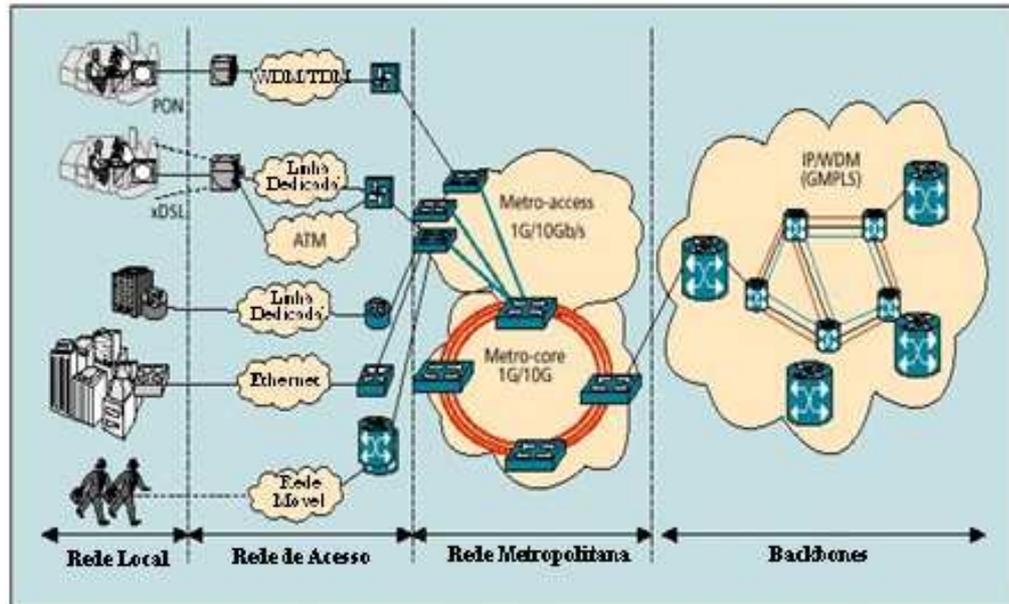


Figura 1 - Redes de Acesso, Redes Metropolitanas e Backbones [Lee , 2004]

As redes de acesso são as responsáveis pela ligação dos usuários finais (assinantes residenciais e corporativos) às Redes Metropolitanas, que por sua vez se interligam às espinhas dorsais (*backbones*) das companhias de telecomunicações.

Neste trabalho o maior interesse se encontra na porção da rede de acesso que está mais próxima do usuário, uma vez que este ainda é gargalo da comunicação. Esta porção foi usualmente chamada de “Última Milha” (*Last Mile*), mas foi estrategicamente renomeada de “Primeira Milha” (*First Mile*) pela comunidade envolvida em seus estudos de modo a caracterizar sua importância e sua carência prioritária de soluções [Kramer, 2002].

As tecnologias de redes de acesso podem ser classificadas segundo seus meios físicos de transmissão [Nunes, 2002], conforme indicado a seguir e explicados nos parágrafos seguintes:

- **Pares de Cobre Trançados**

- Modem de Banda Base<sup>1</sup>
- ISDN
- xDSL
- **Cabos Coaxiais**
  - CATV
  - HFC (*Hybrid Fiber Coax*)
- **Fibra Ótica**
  - Fibra até o Meio-Fio (*Fiber to the Curb* - FTTC)
  - Fibra até a Casa (*Fiber to the Home* - FTTH) ou Fibra até o Prédio (*Fiber to the Building* - FTTB).
- **Linha de Energia**
  - Comunicações através de linha de força (*Power Line Communications* - PLC)
- **Sem Fio (*Wireless*)**
  - GSM/DCS 1800
  - DECT
  - P-MP *Narrowband* FWA
  - *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS)
  - MMDS
  - LMDS
  - IEEE 802.16 (WiMax)
  - *Terrestrial broadcasting*

---

<sup>1</sup> Modem de banda base é um modem que não executa modulação analógica de sinal digital, apenas converte um sinal digital em outro codificado, mais apropriado para transmissão.

Os Modems de banda base têm uma atuação bastante limitada no que diz respeito a largura de banda uma vez que tem um limite teórico de 56000bps no *downlink* e 48000bps no *uplink* (padrão V.92).

A solução ISDN (*Integrated Services Digital Network*) ou RDSI (Rede Digital de Serviços Integrados) é uma tecnologia que permite o tráfego simultâneo de dados e de voz sob a estrutura atual de cabeamento metálico trançado das linhas telefônicas convencionais. Em termos simples, ISDN é uma substituição do serviço telefônico, que não foi desenvolvido para as necessidades da era da informação. Há dois níveis de serviço: a Interface de Taxa Básica (BRI – *Basic Rate Interface*), para uso doméstico e pequenas empresas e, para as grandes empresas, a Interface de Taxa Primária (PRI – *Primary Rate Interface*). Ambas são formadas por três canais básicos: Dois canais do tipo "B", que transmitem e recebem dados a uma taxa de transferência de 64 Kbps, e um canal do tipo "D", de 16 Kbps, que é utilizado por sinais de controle. Como possui estes dois canais, é possível estar conectado a Internet e falar ao telefone simultaneamente. Para conectar-se à internet a 128 Kbps, é necessário usar os dois canais de 64 Kbps. Se alguém ligar para o número do usuário que está relacionado aquele par de canais e este quiser atender a ligação, um dos canais deverá ser desocupado, fazendo que a taxa de transferência caia para 64 Kbps, podendo voltar a 128 Kbps quando a ligação for encerrada. A grande desvantagem deste sistema é que cada canal é considerado como uma linha telefônica e sua utilização simultânea gera acréscimo na cobrança.

A tecnologia ISDN perdeu força nos últimos anos principalmente por conta da adoção dos padrões xDSL, em especial o ADSL, que oferecem taxas de transmissão superiores.

As DSLs (apresentadas pelas companhias telefônicas) utilizam-se dos mesmos pares trançados das linhas de telefones convencionais e necessitam de um modem DSL no assinante e um multiplexador DSL na central de atendimento. As taxas de transmissão variam na faixa de 128Kbps a 6Mbps (no caso da ADSL) e desta forma foram consideradas como acesso de

banda larga, todavia não oferecem suporte total a voz, dados e vídeo. Adicionalmente a cobertura dos multiplexadores DSL, localizados na central de atendimento da companhia, é inferior a 5,5km o que torna restrito o número de assinantes que podem ter acesso a esta tecnologia. A solução de colocar multiplexadores DSL remotos esbarra em questões de alto custo o que definitivamente tem feito as companhias não oferecerem estes serviços a assinantes que estão distantes de seus centros de atendimento.

Companhias de televisão a cabo responderam a demanda de tráfego de Internet, incluindo em sua estrutura de cabos coaxiais serviços de dados. Os cabos coaxiais foram desenvolvidos originalmente para transmissão de vídeo analógico e a solução foi a utilização de cabos híbridos com fibra (*Hybrid Fiber Coax – HFC*) que chegavam em um nó ótico próximo do assinante (Fibra até o Meio-Fio – *Fiber to the Curb*) e a última parte da transmissão para o assinante era feita com cabo coaxial simples. O inconveniente desta arquitetura é que cada nó ótico compartilhado (próximo do assinante) tinha uma capacidade de apenas 36 Mbps e que em horário de pico poderiam ser utilizados simultaneamente por até dois mil usuários, gerando velocidades finais insatisfatórias.

Muito se tem falado da tecnologia de rede de acesso sem fio, mais precisamente de WiMax (IEEE 802.16). “O padrão 802.16 é também conhecido como a interface aérea da IEEE para Wireless MAN, isto é, da rede metropolitana sem fios. Esta tecnologia está sendo especificada pelo grupo do IEEE que trata de acessos de banda larga para última milha em áreas metropolitanas, com padrões de desempenho equivalentes aos dos tradicionais meios tais como DSL, *Cable Modem* ou E1/T1.” [Teixeira, 2004]. O Objetivo deste trabalho não é análise de redes de acesso em meios não guiados, portanto não entraremos em maiores detalhes desta tecnologia.

As soluções até aqui relacionadas para acréscimo de banda na Rede de Acesso em meio físico guiado, apesar de terem extrapolado significativamente as transmissões de 56kbps

dos modems convencionais, ainda não provêem a necessária largura de banda para aplicações crescentes como telefonia sobre IP, vídeo sob demanda e vídeo conferência bidirecional.

Uma nova tendência é a utilização de “fibra até o prédio” (*Fiber to the Building - FTTB*) ou “fibra até a casa” (*Fiber to the Home – FTTH*) que adentram toda a rede de acesso, diferentemente das arquiteturas propostas anteriormente onde as fibras funcionavam como *links* para as redes de cabos coaxiais e de pares trançados.

FTTH é uma arquitetura que propicia acessos em banda larga para uma série de serviços, tais como Internet, telefonia, televisão a cabo, redes de televisão e serviços de vídeo interativo em duas vias, através de uma rede totalmente óptica. Todos estes serviços são oferecido sobre uma rede totalmente ótica e passiva com a chegada desta fibra até a casa do assinante. Com o FTTH, a rede de acesso é capaz de prover velocidades de 10 Mbps até 10 Gbps.

A chegada da fibra até o usuário final (FTTH) gera a necessidade de uma nova tecnologia para utilização da alta largura de banda teórica das fibras óticas a um custo baixo e com baixa necessidade de manutenção. As Redes Óticas Passivas (*Passive Optical Networks – PONs*) são vistas como uma solução bastante atrativa para a “primeira milha” das redes de acesso.

Dois grandes grupos, o FSAN (*The Full Service Access Network*) e o EFMA (*Ethernet First Mile Alliance*) [FTTH, 2011], visualizam as redes óticas passivas (PONs) como solução para redução dos custos e viabilização de parâmetros de qualidade de serviço (QoS) nas redes de acesso.

## **1.2 A relevância do tráfego de melhor esforço**

É evidente o surgimento, desenvolvimento e crescimento de novas aplicações multimídia na Internet, sendo a maioria destas inovações sensíveis aos parâmetros de qualidade de serviço, tal como o atraso fim-a-fim. Todavia o tráfego tradicional de Internet

(HTTP, email, FTP, mensagens instantâneas entre outras aplicações menos sensíveis a parâmetros de QoS) ainda representam uma significativa parcela dos dados trafegados ao longo da rede mundial.

Desde o ano de 2000 [CISCO, 2010] o tráfego P2P (*peer-to-peer*), que engloba diversos sistemas tais como *Bit Torrent*, *e-Donkey* entre outros, representa a maior parcela de tráfego na Internet, mesmo quando considerado o uso comercial desta (e não apenas do usuário doméstico). Tipicamente este tipo de tráfego se enquadra na classe de serviço de melhor esforço (*Best Effort* – BE).

A Tabela 1, baseada em dados da CISCO [CISCO, 2010], mostra a participação dos tipos de serviços no tráfego global de IP ao longo do ano de 2010<sup>2</sup>.

Tabela 1 - Participação dos diversos tipos de tráfegos IP no mundo ao longo do ano de 2010

<b>Tipo de Tráfego</b>	<b>Volume de Dados em Petabytes por mês</b>	<b>%</b>
File Sharing (P2P)	5075	40,01
Internet Video	4725	37,25
Internet Video to TV	263	2,07
Web/Data	2273	17,92
Video Calling	128	1,01
Online Gaming	86	0,68
VoIP	134	1,06
<b>*** Total ***</b>	<b>12684</b>	<b>100</b>

Mesmo se considerando a projeção da CISCO [CISCO, 2010] para o ano de 2014 a participação do tráfego BE ainda é bem significativa (ver Tabela 2)

Tabela 2 - Participação dos diversos tipos de tráfegos IP projetada para o ano de 2014

<b>Tipo de Tráfego</b>	<b>Volume de Dados em Petabytes por mês</b>	<b>%</b>
File Sharing (P2P)	11340	26,96
Internet Video	19468	46,28
Internet Video to TV	4075	9,69
Web/Data	6134	14,58
Video Calling	599	1,42
Online Gaming	307	0,73
VoIP	146	0,34
<b>*** Total ***</b>	<b>42069</b>	<b>100</b>

<sup>2</sup> O relatório da CISCO [CISCO, 2010] é de junho de 2010. Portanto dados relativos a este mesmo ano (2010) são em parte baseados em previsões.

Pode-se ver que numa projeção para os próximos 3 anos a demanda de tráfego tipicamente não sensível ao atraso fim-a-fim ainda estará acima da faixa do 40% do tráfego IP mundial. Desta forma, pode-se concluir que a viabilização deste tráfego não pode ser negligenciada em nome dos tráfegos de classes de serviços superiores, o que justifica a preocupação deste trabalho com o desempenho do tráfego de melhor esforço nas redes de acesso.

### **1.3 Aspectos de Análise de Desempenho**

A seção 5 desta dissertação analisará os resultados obtidos com a proposta de melhoria do IPACT, que é um algoritmo de alocação de largura de banda para Redes Ópticas Passivas Ethernet (algoritmo detalhado na subseção 3.2). Esta análise é feita em cima do atraso total de transmissão de quadros dentro da rede. Em última instância o que a seção 5 faz é analisar o desempenho do tráfego de subida comparando-o com o algoritmo sem a melhoria proposta neste estudo. Portanto a atual subseção tem como objetivo mostrar alguns aspectos relevantes sobre análise de desempenho e situar a técnica usada neste trabalho.

Analisar o desempenho de um sistema pode ser uma tarefa bastante subjetiva, uma vez que o termo “Análise de Desempenho” engloba diversas perspectivas sobre uma situação ou problema analisado. Mesmo na área de Tecnologia da Informação o termo tem uma grande amplitude, visto que um mesmo sistema pode ser analisado, por exemplo, em relação ao seu tempo de processamento ou à sua usabilidade por parte de seus clientes. Jain [Jain, 1991] escreve em seu livro que diferentemente do senso comum, análise de desempenho é uma arte e, como todo trabalho de arte, não pode ser produzido mecanicamente. Toda a avaliação necessita de alto grau de conhecimento do sistema que esta sendo modelado e de uma criteriosa seleção da metodologia, carga e ferramentas a serem utilizadas.

Dentro do escopo deste trabalho a análise será feita em relação ao desempenho do tráfego na rede que está relacionado com a qualidade que um produto trafegando na rede é oferecido ao cliente.

Para medir a qualidade de um serviço oferecido na rede, diversos parâmetros (métricas de desempenho) podem ser usados. A maioria destes parâmetros é relacionada com o tempo: latência (tempo total gasto por uma unidade de informação da origem até o destino), *jitter* (variação da latência – ou seja, a variação entre o tempo de chegada das unidades de informação no seu destino), vazão (quantidade de informação transmitida por unidade de tempo) entre outros. Parâmetros não diretamente relacionados com o tempo também podem ser usados como medida de desempenho: perdas (mede o número de unidades de informação enviadas pelo transmissor que nunca chegaram ao receptor) ou taxa de erros (que mede quanto precisa ser retransmitido em função de um erro detectado).

A análise de desempenho de uma rede pode ser feita antes desta existir (*a priori*) ou em uma rede existente (*post mortem*). As avaliações *post mortem* têm como objetivo detectar gargalos na rede, identificar eventuais serviços ou situações que estejam comprometendo o desempenho desta ou mesmo verificar se esta rede está apta a receber uma nova carga de serviços com suas exigências específicas.

A avaliação *a priori* permite prever aspectos de funcionamento da rede bem como medir parâmetros de qualidade de serviços antes mesmo que a rede seja efetivamente implantada, o que pode gerar redução nos custos.

Ainda é possível agrupar a avaliação de desempenho conforme a técnica utilizada para obtenção dos resultados, podendo esta ser uma técnica de aferição ou de modelagem. Dentro do processo de aferição têm-se protótipos, *benchmarks* e a coleta de dados no ambiente real. A modelagem pode ser analítica ou por simulação.

Protótipo é um sistema/modelo apenas com algumas funcionalidades básicas para o funcionamento do próprio protótipo, utilizado geralmente para aprovação de quem vai avaliar ou utilizar o sistema.

Em computação, *benchmark* é o ato de executar um programa de computador, um conjunto de programas ou outras operações, a fim de avaliar o desempenho relativo de um sistema, normalmente executando-se uma série de testes padrões e ensaios nele. Um conjunto padronizado de *benchmarks* bem conhecido é o mantido pela SPEC (*Standard Performance Evaluation Corporation*) que é uma corporação sem fins lucrativos mantida por grandes fabricantes da área de TI que visa desenvolver e apoiar um conjunto padronizado de parâmetros relevantes que podem ser aplicadas à nova geração de computadores de alto desempenho [<http://www.spec.org/>].

A modelagem analítica consiste em criar um modelo matemático que represente o sistema real. Em geral são usados modelos matemáticos baseados em teoria de filas, redes de Petri e cadeia de Markov. Os sistemas analíticos possuem uma solução fechada, ou seja, a solução para as equações utilizadas para descrever as mudanças em um sistema pode ser expressa como uma função matemática analítica.

A simulação é uma ferramenta estatística para analisar sistemas reais, que imita o funcionamento lógico do sistema ao longo do tempo em um modelo de computador. A simulação permite analisar sistemas complexos que não são passíveis de se tratar com modelos matemáticos que se possam resolver analiticamente.

Em geral simulações de sistemas complexos geram uma carga computacional significativa o que torna bastante lento o processo de coleta de dados da simulação. Por sua vez o processo de modelagem analítica pode ser bastante laborioso principalmente para modelagem de sistemas paralelos.

Neste trabalho optou-se por um modelo híbrido analítico-simulado. A PON foi modelada em Rede de Petri e uma ferramenta de simulação obteve os parâmetros de interesse que posteriormente foram usados nas equações matemáticas para obter os resultados apresentados (atraso).

## 1.4 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é propor uma melhoria nos esquemas de alocação de largura de banda em Redes Ópticas Passivas Ethernet (EPONs), de modo a diminuir a penalização do tráfego de menor esforço (*Best Effort – BE*). Através desta proposta, espera-se manter os serviços prioritários dentro de seus requisitos de funcionamento sem que, para isto, sua alta carga inviabilize o tráfego menos privilegiado. A proposta se baseia na análise do atraso de quadros na rede óptica passiva, que é um parâmetro fundamental para a qualidade dos serviços oferecidos na rede.

Também é objetivo deste trabalho a criação de um modelo de Rede Óptica Passiva Ethernet mais flexível de modo que seja possível executar as iterações de simulação rapidamente e permitir modelagem de diferentes classes de serviços nos usuários finais. O modelo então foi desenvolvido usando Redes de Petri Coloridas modeladas na ferramenta DaNAMICS [DaNAMICS, 2009].

## 1.5 Organização da dissertação

Além deste capítulo introdutório que apresenta os objetivos, este texto possui mais seis capítulos que detalham as redes ópticas passivas, analisam os esquemas de alocação de largura de banda nestas, posicionam a teoria de fila e redes de Petri dentro do trabalho, propõem a melhoria do esquema de alocação e analisam a proposta do trabalho.

O segundo capítulo apresenta o conceito das Redes Ópticas Passivas, mostra a viabilidade destas como alternativa ao problema das redes de acesso e especifica os diversos padrões de Redes Ópticas Passivas existentes.

No terceiro capítulo, analisa-se o que é definido no padrão IEEE802.3ah para auxiliar os esquemas de alocação de largura de banda em Redes Ópticas Passivas Ethernet mostrando seus parâmetros de sinalização. Lista-se neste capítulo, também, as classes de serviços e seus requisitos conforme padrão IEEE 802.1D. Faz-se uma descrição do IPACT (*Interleaved Polling with Adapting Cycle Time*) que é um esquema de alocação de largura de banda estatístico para as ONUs no sentido de subida e que servirá de base para a proposta deste trabalho bem como é mostrada a modelagem em teoria de filas deste esquema.

No quarto capítulo, apresenta-se efetivamente a proposta desta dissertação. Inicia-se com os trabalhos relacionados e situando-os em relação o trabalho aqui apresentado. Mostra-se a modelagem feita para realizar os experimentos nos diversos cenários propostos e obter os resultados expostos no capítulo 5, ressaltando a flexibilidade do modelo criado. Ainda neste capítulo, apresenta-se o processo usado para validar o modelo proposto.

No quinto capítulo, faz-se a análise dos resultados obtidos. Primeiramente mostram-se os cenários usados, a justificativa da escolha destes cenários e se apresentam os resultados obtidos para, então, finalizar com uma análise comparativa da proposta.

No último capítulo, analisam-se os resultados e sugerem-se novos trabalhos a serem desenvolvidos.

# 2

## REDES ÓPTICAS PASSIVAS

*Este capítulo apresenta o conceito das Redes Ópticas Passivas, mostra a viabilidade destas como alternativa ao problema das redes de acesso e especifica os diversos padrões de Redes Ópticas Passivas existentes.*

### 2.1 Redes ópticas como solução para redes de acesso

Levar a fibra ótica até o usuário final é permitir que, devido à alta capacidade de transmissão delas, uma série de serviços sejam disponibilizados para o assinante sob uma única infraestrutura. O desenvolvimento de aplicações e serviços que requerem maior largura de banda, tais como vídeo sob demanda e televisão de alta definição, associado à previsão do crescimento de usuários banda larga, fez com que o investimento em infraestrutura de fibra ótica fosse visto com nova dimensão.

Muito do desenvolvimento atual das redes de banda larga, baseadas na tecnologia ótica, foi conseguido em consequência de um papel ativo e estimulante das agências governamentais [Nowak, 2005]. Estas agências são responsáveis por executar políticas que incentivam o desenvolvimento de redes de acesso de banda larga como uma maneira de aumentar a inclusão digital da população. Este é, em especial, o caso nos países asiáticos, onde se tem a maior penetração do acesso da banda.

Segundo Nowak [Nowak, 2005], o Ministério de Gerência Pública do Japão estimou que em 2006 haveria 7,73 milhões de casas conectadas à Internet por meio da fibra ótica naquele país. Dados de outubro de 2008 revelam que este número atingiu 10,2% das conexões de Internet nesse país contra 9,6% de tecnologias DSL [Magalhães, 2011]. Ainda de acordo

com Nowak na Coreia do Sul já se tem 74% da população conectada à Internet via banda larga e as operadoras investem pesadamente em infraestrutura de fibra ótica para não perderem sua fatia de mercado junto aos consumidores. Em 2008 o número de assinantes sob fibra ótica na Coreia atingiu o patamar de 10,2 conexões por 100 habitantes, contra 10,5 por TV a cabo e 8,4 por tecnologia DSL [Magalhães, 2011].

Outra razão para o interesse crescente em acesso de banda larga é a crise global deflagrada após o 11 de setembro e reforçada em 2008. O estouro da “bolha econômica” acertou em cheio as grandes companhias de telecomunicações e estas foram obrigadas a revisar suas estratégias de negócios. Paltridge [Paltridge, 2003] mostra que a crise não foi causada pela diminuição da demanda por serviços de telecomunicações e sim pela expectativa inflada sobre a demanda constante por novos equipamentos. Paltridge ainda indica que os núcleos das redes de longo alcance não são mais o gargalo das comunicações e portanto não reside aí a necessidade de renovação da infraestrutura. Em contrapartida as redes de acesso de banda larga e as redes móveis assumem esta necessidade de renovação e tornam-se o alvo da indústria uma vez que estas atingiram recordes em seu crescimento, sendo vistas como o principal foco de retorno do investimento.

Segundo o *FTTH Council Europe* [FTTH, 2011], os países que investem mais pesadamente na chamada "*fiber to the home*" (fibra até a casa) são da Europa Oriental, um clube que ganhou a adesão de Portugal e da Turquia no ano passado. Lituânia, Eslovênia, Eslováquia e Rússia lideram os novos investimentos. Em grande parte por terem tido até bem pouco tempo redes de telecomunicações incipientes. Na Rússia há duas empresas cobrindo prédios e casas em 15 cidades. Até o fim de 2010 havia mais de um milhão de domicílios atendidos. A expectativa é de que a Rússia lidere o ranking de maior cobertura mundial até 2015.

O *FTTH Council Europe* é uma organização da indústria que visa criar condições para que operadoras e serviços de telecomunicações instalem as fibras ópticas mais rapidamente. O objetivo é garantir acesso à internet em altíssima velocidade, tanto para consumidores residenciais como para empresas. Os dados da tabela 3 são do FTTH Handbook de 2011 [FTTH, 2011] e mostram a penetração da fibra óptica em alguns países em relação ao número de domicílios.

Tabela 3- Penetração de F.O. em domicílios no mundo

<b>País</b>	<b>% de domicílios atendidos por fibra óptica (penetração)</b>
Coréia do Sul	55,00
Japão	39,00
Hong Kong	34,00
EUA	34,00
Taiwan	30,00
Lituânia	22,62
Suécia	13,64
Eslovênia	13,63
Eslováquia	9,23
França	1,84
Itália	1,55
Turquia	1,27

No Brasil o Plano Nacional de Banda Larga (PNBL), lançado em 2010 pelo Governo Federal, pretende instituir uma Rede Nacional de fibra óptica, sob domínio da União, visando melhorar a infraestrutura para banda larga no Brasil e disseminar a oferta do serviço. A Rede Nacional terá como foco prioritário constituir uma rede corporativa federal nas capitais, atender a pontos de governo e de interesse público e ofertar capacidade em localidades sem prestadores de serviço de comunicação ou que operem nestas localidades com preços elevados, regiões com baixa atratividade econômica, bem como em áreas de baixa renda nas regiões metropolitanas. A Rede será operada pela Telebrás e pretende atingir 4.278 municípios até 2014 [Presidência, 2011].

A questão do custo sempre está presente quando se analisa a viabilidade de uma rede ótica até o assinante final. Pode-se dividir esta questão em dois pontos principais. O custo de implantação e o custo de operação. Segundo o *FTTH Handbook* de 2011 o custo com equipamentos ativos em uma rede atinge 26% do custo de implantação, ficando apenas atrás do custo de obras civis que correspondem a 46%. Como uma rede ótica passiva (PON) reduz significativamente o número de elementos ativos na rede as PONs mostram-se uma alternativa interessante como solução de acesso ao assinante final.

Os custos de operação incluem diversos aspectos, entre eles questões que independem da tecnologia usada, tais como marketing e aquisição/gestão dos assinantes. Todavia é certo que a simplicidade da rede instalada é fator decisivo para a redução final dos custos de operação. Mais uma vez as Redes Óticas Passivas e em especial as Redes Óticas Passivas Ethernet (que mantiveram sua compatibilidade com as Ethernet predecessoras) apresentam-se como ótimas alternativas para a rede de acesso.

A idéia de Redes Óticas Passivas (PONs) foi concebida inicialmente a mais de 20 anos como uma resposta ao problema de largura de banda limitada nas redes de acesso, nesta época as fibras óticas estavam ainda em desenvolvimento e somente após alguns anos obteve-se transmissores e receptores capazes de tornar possível uma rede de acesso baseada em tecnologia ótica.

## **2.2 Componentes básicos de uma rede ótica passiva**

Uma maneira lógica de levar a fibra até o usuário final é a utilização de redes ponto-a-ponto onde cada fibra é levada individualmente da companhia de telecomunicação até cada um dos usuários (Figura 2-a). Apesar de simples, esta solução esbarra na enorme necessidade de fibras ao longo de todo o encaminhamento. Outra solução possível é a utilização de *Switches* (concentradores) próximos aos pontos de utilização (*curb switches*) (Figura 2-b) o

que reduziria a necessidade de tantas fibras ao longo do encaminhamento. Todavia a utilização destes concentradores, além de inserir um elemento ativo entre a operadora e o usuário, requer que o local possua alimentação elétrica.

A utilização de PONs (Figura 2-c) reduz a utilização da fibra ótica e ainda elimina qualquer elemento ativo ao longo do seu encaminhamento até o usuário final. Uma PON é uma rede ótica Ponto-a-Multiponto com nenhum elemento ativo em seu encaminhamento desde a origem até o destino. Os únicos elementos internos de uma PON são passivos, tais como divisores e derivadores de sinais (sinais óticos).

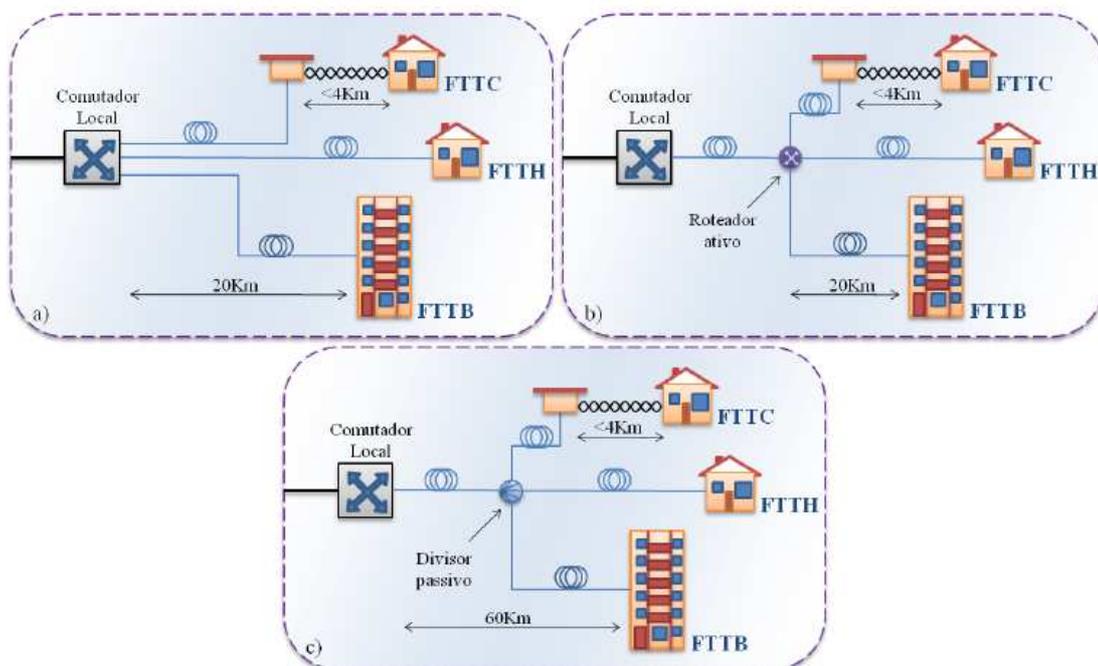


Figura 2 - Fibra até o usuário final [Mokarzel, 2010]

Uma PON usa um elemento passivo (sem necessidade de alimentação elétrica) para dividir o sinal ótico de uma fibra em diversas outras fibras e, inversamente, combinar sinais óticos de diversas fibras em uma única fibra. Esse elemento passivo é um acoplador ótico que basicamente é a fusão de duas fibras em conjunto que geram a derivação do sinal de entrada nas duas saídas. Acopladores de maior ordem ( $N \times N$ ) pode ser obtidos pela combinação de

acopladores de ordem 2 ( $2 \times 2$ ). Os acopladores são caracterizados pelos seguintes parâmetros:

- Perda de Divisão (*Splitting Loss*) – É o nível de potência na saída comparado o nível de potência na entrada, medida em dB. Para um acoplador ideal  $2 \times 2$  este valor é de aproximadamente 3dB.
- Perda por Inserção (*Insertion Loss*) – É a perda de potência por imperfeição na fabricação. Valores típicos entre 0.1dB e 1dB.
- Directividade (*Directivity*) – Com intuito de impedir o vazamento de potência de uma porta de entrada para outra porta de entrada os acopladores são elementos extremamente direcionais com o parâmetro de “directividade” atingindo 40-50dB.

Os acopladores em geral são fabricados para terem apenas uma saída ou apenas uma entrada. Os acopladores com apenas uma entrada são denominados “splitters” e os com apenas uma saída são denominados *combiners*.

As vantagens de utilizar PONs nas redes de acesso de assinantes são muitas, principalmente quando comparadas com outras tecnologias em uso:

- As PONs permitem longa distâncias, até 20km, entre as centrais de atendimento (concessionárias) e o usuário final.
- O núcleo da rede é transparente ao sinal, o que torna o desenvolvimento de novos serviços ou protocolos mais simples.
- As PONs diminuem a quantidade de fibra lançada (em contrapartida à solução ponto-a-ponto).
- As PONs oferecem taxas de transmissão na casa dos Gigabits por segundo (em contrapartida as baixas velocidades de Cable Modems e DSLs).
- As PONs eliminam a necessidade de instalação de elementos ativos intermediários o que reduz os custos com manutenção principalmente por estes (elementos ativos) estarem fora da central o fora da casa do usuário.
- Os elementos passivos das PONs não necessitam de alimentação elétrica, logo reduzem os custos com este insumo para as concessionárias.

O ETSI definiu em 1997 na ETS 300 681, “*Optical Distribution Network (ODN) for Optical Access Network (OAN)*” [ETS97] que vem a ser a rede de distribuição óptica (ODN) para a rede de acesso óptica (OAN).

Tal como se pode observar na Figura 3, a ODN está localizada entre as ONU (*Optical Network Unit* ou Unidade Ótica de Rede) e a OLT (*Optical Line Terminal* ou Terminal Ótico de Linha). Em geral a ODN proporciona o meio de transmissão óptico para a conexão física das ONUs às OLT. Fazem parte da ODN os seguintes elementos passivos: fibras mono-modo, cabos de fibras mono-modo, conectores ópticos, dispositivos ópticos de ramificação (*branching*), atenuadores óticos fixos, junções de fusão (*fusion splices*), filtros óticos, dispositivos WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) e amplificadores óticos.

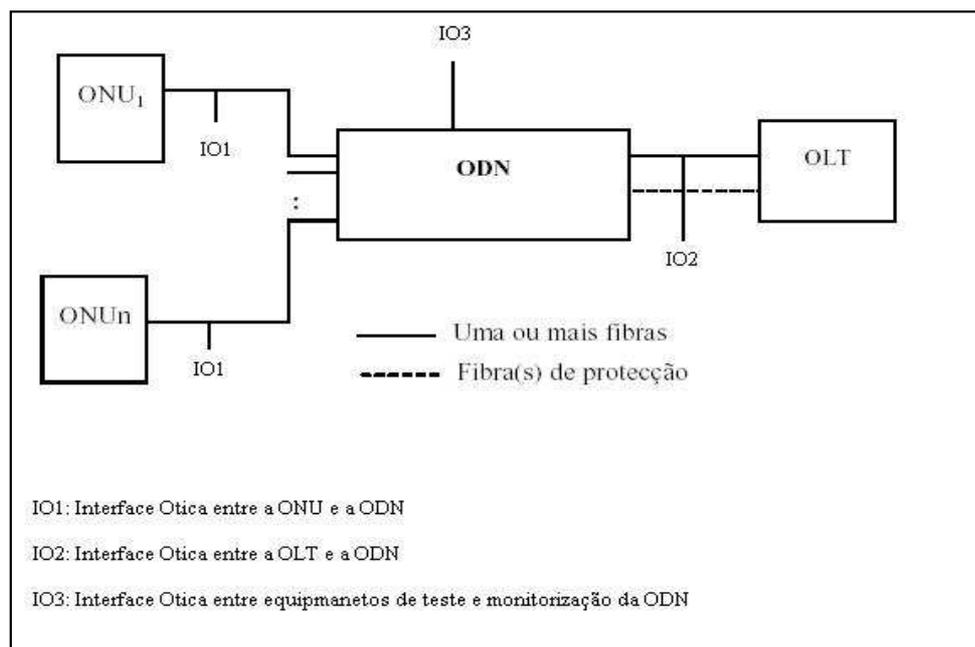


Figura 3 - Esquema da ETS 300 681 da ETSI [ETS97]

### 2.3 Arquitetura de uma rede óptica passiva

A simplicidade é o aspecto mais atraente da arquitetura de uma PON. O Terminal Ótico da Linha (OLT) é o elemento principal da rede e é colocado geralmente no âmbito do provedor de serviço. As Unidades Óticas da Rede (ONUs) servem como uma interface com a rede e estão presentes no lado do cliente. As ONUs são conectadas à OLT por meio de uma

fibra ótica e nenhum elemento ativo atua na ligação. Uma única ONU pode servir com ponto de acesso para um único usuário (FTTH) ou a vários (FTTB ou FTTC).

Existem diversas topologias multiponto que podem servir para redes de acesso, incluindo: Árvore (Figura 4-a), Anel (Figura 4-b) e Barramento (Figura 4-c), assim como suas combinações. As PONs podem ser configuradas em todas estas topologias e ainda podem ser adaptadas para ter redundância, como em árvores duplas ou anéis duplos.

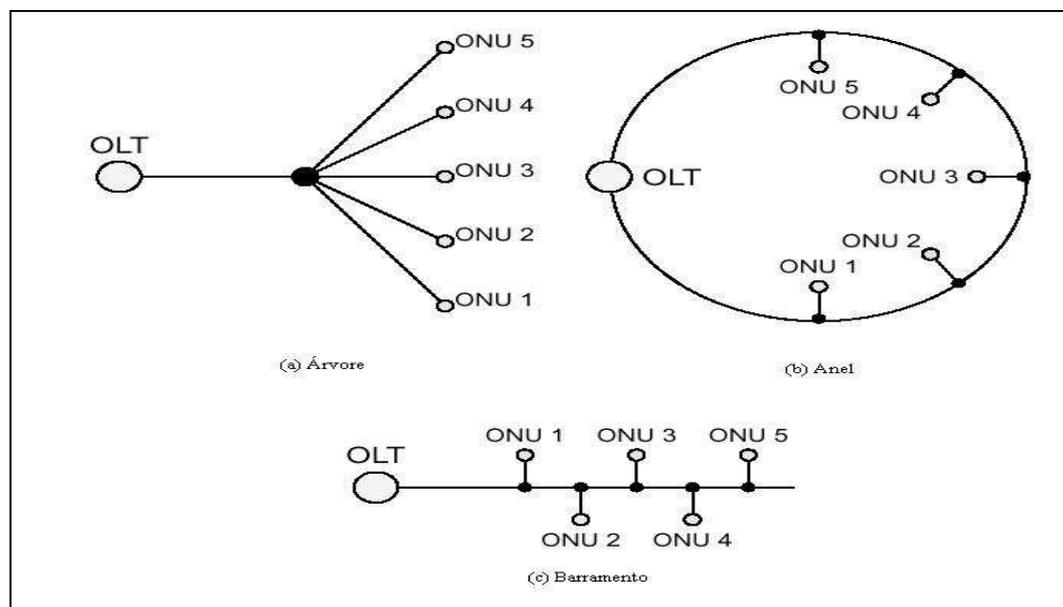


Figura 4 - Topologias de PONs [Nowak, 2005]

Embora as diferentes topologias tenham aplicação específica e melhor performance para cada situação, as propriedades físicas dos modernos receptores, que trabalham em modo de rajada, tornam difícil de obter PONs de barramento e de anel uma vez que as distâncias entre a OLT e as ONUs são significativamente diferentes entre si. Inversamente, na configuração de árvore as distâncias entre OLT e as ONUs são similares. Desta forma os níveis de potência do sinal no receptor na OLT variam menos. Esta característica tem um efeito crucial no desempenho das PONs, pois, além da variação na potência do sinal no receptor poder ser uma fonte de erro, os mecanismos para compensar as imperfeições do receptor, nesta topologia, são mais fáceis de implementar.

## 2.4 Princípio de operação das PONs

O elemento principal que distingue as PONs de outras redes cabeadas é o divisor (*splitter*), que é o responsável pelo comportamento assimétrico em PONs tipo árvore e as tornam similares aos sistemas sem-fio ou via satélite.

Na direção de *downstream*, ou seja em direção da operadora ao usuário final temos a transmissão feita de um Terminal de Linha Ótico (*Optical Line Terminal – OLT*) para uma Unidade de Rede Ótica (*Optical Network Unit – ONU*) e a transmissão é do tipo ponto-a-multiponto (ver figura 5). Os sinais neste sentido emitidos pelo OLT, chegam na entrada do divisor e então o mesmo sinal alcança cada ONU. Evidentemente o sinal é atenuado mas sua estrutura e propriedades são mantidas. Embora a natureza ponto-a-multiponto da PON no sentido *downstream* crie as restrições a respeito da segurança, nenhuma gerência de tráfego e nenhum algoritmo de alocação de largura de banda são necessários. A princípio esta situação nas PONs pode ser comparada com uma situação onde o mesmo sinal emitido por um satélite é recebido por estações diferentes na terra.

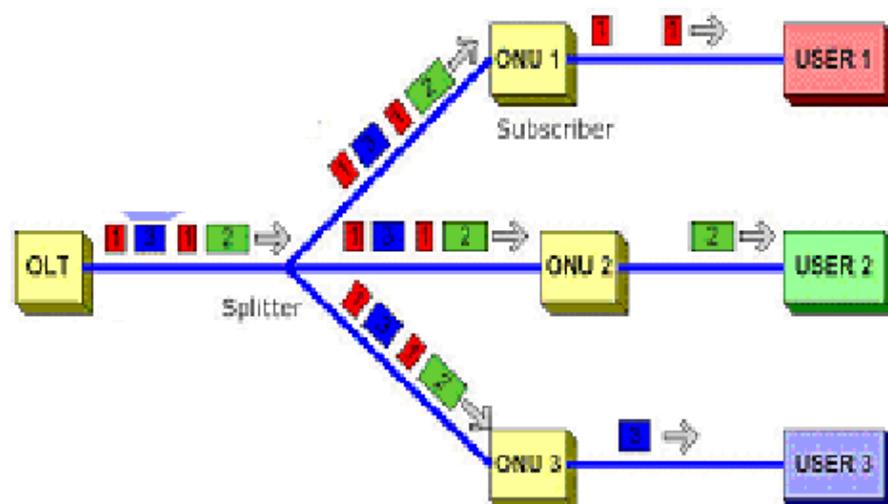


Figura 5 - Tráfego Downstream em PONs [Pesavento, 2001]

Na direção de *upstream*, ou seja, em direção do usuário final para a operadora temos a transmissão feita da ONU para a OLT e a transmissão é do tipo multiponto-a-ponto (figura 6).

Os sinais das diferentes ONUs chegam nas entradas do divisor e, devido a sua propriedade direcional, o quadro de dados oriundos das ONUs atingirá somente a OLT e não outra ONU. Desta forma na visão da ONU a rede passa a ser uma rede ponto-a-ponto, uma vez que esta estará transmitindo somente para a OLT, todavia, diferentemente das redes realmente ponto-a-ponto os quadros de diferentes ONUs podem colidir. Assim sendo as ONUs tem que compartilhar os canais e recursos do meio (tronco da fibra), necessitando de controle sobre esse procedimento.

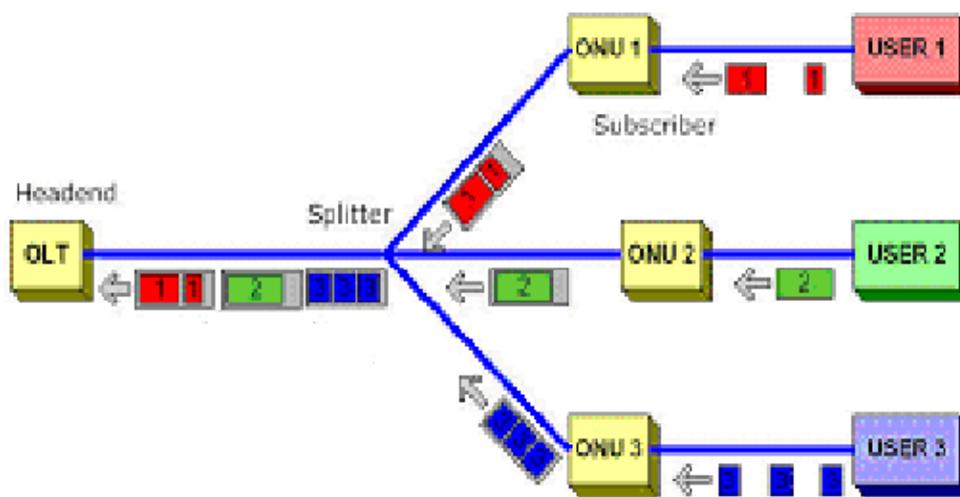


Figura 6 - Tráfego Upstream em PONs [Pesavento, 2001]

Uma possibilidade de separar os canais da fibra é usando a multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing – WDM*) na qual cada ONU opera em diferentes comprimentos de onda. Apesar de, teoricamente, esta ser uma solução simples, os custos de implementação ainda são expressivos para as redes de acesso, uma vez que serão necessárias receptores sintonizáveis ou uma variedade de receptores na OLT para receber os diversos canais. Outro problema mais sério ainda seria a não padronização das ONUs uma vez que *lasers* diferentes teriam de ser instalados em cada ONU dificultando a

manutenção destas. A solução de uso de lasers sintonizáveis também esbarra na questão de alto custo [Kramer, 2002].

Evidentemente alguns autores não consideram esta restrição do custo pois a tendência do mundo da tecnologia é que os preços caiam significativamente com o passar dos anos. Mas vale ressaltar aqui que em alguns casos (como na tecnologia ATM) esta redução nunca se tornou realidade.

A implementação do acesso via multiplexação por divisão do tempo (*Time Division Multiplex Access - TDMA*) é considerada o método preferido para alocação de canais em redes óticas de acesso pois permitem um único comprimento de onda no *upstream* e um único *transceiver* na OLT [Kramer, 2002].

## **2.5 Padronização das Redes Óticas Passivas**

Os padrões atuais existentes de PONs são resultados dos esforços de dois grupos diferentes de fornecedores de serviços rede e de vendedores de equipamentos. Os padrões representam as visões e as atitudes diferentes destes grupos para o problema e o futuro possível do mercado da telecomunicação [Nowak, 2005]. Estes dois grupos são o FSAN (*Full Service Network Access*) e o EFMA (*Ethernet in the First Mile Alliance*).

O FSAN (<http://www.fsanweb.org>) é um fórum de fornecedores de serviços das telecomunicações e de fornecedores de equipamentos que visam um objetivo comum, que é tornar as redes de acesso em redes verdadeiramente de banda larga. Participam deste fórum, entre outras, as seguintes companhias de telecomunicações: Bell Canadá, BellSouth Corporation (EUA), Bezeq (Israel), BT (Inglaterra), France Telecom (França), Deutsche Telekom (Alemanha) e também os seguintes fornecedores de equipamentos: Alcatel, Conexant, Lucent Technologies, Fujitsu, Motorola, NEC, Siemens, Nortel e etc..

O EFMA, que desde 2004 passou a ser parte integrante do MEF (*Metro Ethernet Fórum*) (<http://www.metroethernetforum.org/EFMA.htm>), foi fundado pelas seguintes

companhias: Accton, AllOptic, BATM Telecom, Cisco, Elastic Networks, Ericsson, Extreme Networks, Fiber in the Loop, Finissar, Hatteras Networks, Infineon, Intel, NTT Communications, Passave, Texas Instruments e World-wide Packets tem hoje como membros empresas que também participam do FSAN, tais como a Siemens, a Alcatel, a Bellsouth e outras. Dentre os objetivos do EFMA estão: desenvolver padrões e promover produtos baseados na tecnologia Ethernet para a primeira milha, posicionar a Ethernet como a principal tecnologia de networking na primeira milha e criar a cultura, o avanço e a aceitação da indústria Ethernet na primeira milha das redes de acesso.

### **2.5.1 BPON/APON**

“A padronização da *Broadband Passive Optical Networks* (BPON) (rede ótica passiva de banda larga) foi a primeira a ser definida. Em 1999 esta foi aceita pela *International Telecommunications Union* (ITU)” [Nowak, 2005]. A FSAN foi responsável pelo endosso desta padronização e esta propôs que o protocolo ATM deveria ser usada para carregar dados do usuário, desta forma algumas referências a este padrão são feita como APONs (*ATM Passive Optical Networks*).

A arquitetura da BPON é bastante flexível e se adapta bem a diferentes cenários. O protocolo subjacente ATM fornece suporte para diferentes tipos de serviço por meio das camadas da adaptação. O pequeno tamanho das células ATM e o uso dos canais e caminhos virtuais permitem a alocação da largura de banda disponível aos usuários com bom ajuste fino. Além disso, o desenvolvimento do ATM nos *backbones* das redes metropolitanas e seu fácil mapeamento em recipientes SDH/SONET permitem o uso de somente um protocolo entre um usuário de uma extremidade a outra. [Nowak, 2005]

Apesar das vantagens citadas, a BPON não atingiu a popularidade esperada. A complexidade do protocolo ATM, que o torna de difícil implantação, muitas vezes se

apresenta como supérfluo. O protocolo Ethernet, muito mais simples e amplamente difundido em redes locais, começou a substituir o ATM nos *backbones* das redes metropolitanas.

### 2.5.2 GPON

No último padrão BPON, a capacidade da transmissão foi expandida a 622 Mbps no sentido *upstream* e a 1,2 Gbps no sentido *downstream*. Entretanto, acredita-se que atingir a sincronização em velocidades mais altas (acima de 622 Mbps - *upstream*) é muito elevado dado à especificação da camada física das BPONs [Tatsuta, 2003]. Conseqüentemente, a discussão de uma especificação nova de PON para a transmissão na classe de gigabit-por-segundo começou em abril 2001 liderada pelo grupo FSAN. Para esta nova PON, um novo formato do quadro (*frame*) foi discutido de forma a também transmitir eficientemente pacotes de tamanho variados, longos tais como o Ethernet e curtos tais como células de 53 bytes ATM.

Como resultado do trabalho em 2003 o ITU lançou e adotou um novo padrão chamado *Gigabit Passive Optical Network* (GPON).

A funcionalidade do GPON foi fortemente baseada em seu predecessor (BPON), embora não mais baseado no ATM como protocolo subjacente. Ao invés deste, um bem mais simples “procedimento de enquadramento geral” (*Generic Framing Procedure* – GFP) é usado para fornecer a sustentação tanto para voz quanto para serviços orientados de dados. Uma grande vantagem do GPON sobre outros esquemas é que todas as interfaces para os principais serviços são fornecidas. O emprego do GFP garante que pacotes oriundos de diferentes protocolos sejam transmitidos em seu formato original. Funcionalidades também foram embutidas que permitiram transparente integração com outras GPONs e BPONs.

Nas redes modernas a segurança é fator crucial na transmissão de dados. Um sofisticado mecanismo baseado no *Advanced Encryption Standard* (AES) e em uma troca complexa de chaves únicas foi construído para a arquitetura GPON.

Comparativamente com o padrão BPON taxas de transmissões mais elevadas são especificadas. As GPONs fornecem 2,5 Gbps de largura de banda *downstream* e 1.25 Gbps *upstream* compartilhada por um máximo de 64 usuários. Mais recentemente [FTTH, 2011] sob nova nomenclatura (XG-PON) estas atingem 10 Gbps *downstream* e 2,5 Gbps *upstream* para até 128 usuários

### 2.5.3 EPON

O padrão EPON é resultado dos trabalhos do grupo EFMA. Notando que a maioria do tráfego na rede é orientado a dados e que mecanismos eficientes para suporte de aplicações em tempo real já eram realidade, o grupo acreditou que os sofisticados protocolos do BPON e do GPON não mais eram necessários. Uma vez que o protocolo Ethernet está bastante difundido e se tornou dominante nas redes locais e metropolitanas [Nowak, 2005], o EFMA decidiu ampliar sua aplicação para as PONs. A versão final do novo protocolo, com as adaptações necessárias, foi aceita pelo IEEE que a liberou como 802.3ah em setembro de 2004 [Nowak, 2005]. O principal objetivo deste padrão era atingir a total compatibilidade com outras redes Ethernet. Desta forma, a funcionalidade da camada de controle de acesso ao meio da Ethernet (MAC) é mantida e as extensões são fornecidas para abranger as características das PONs. A solução atingida é simples e direta, permitindo a reutilização da tecnologia e de equipamentos legados. Em setembro de 2009 [FTTH, 2011], o IEEE ratificou um novo padrão, EPON-10G, oferecendo 10 Gbps taxa de bits simétrica. Este novo padrão manteve toda a compatibilidade dos quadros ethernet e sinalizações especificadas no IEEE802.11ah.

Uma EPON é uma PON que carrega todos os dados encapsulados em quadros (“frames”) Ethernet. O padrão IEEE 802.3 define duas configurações básicas para redes Ethernet: no primeiro caso esta ocorre sobre um meio de acesso compartilhado usando o

protocolo CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*); no outro caso as estações podem ser conectadas através de um *switch* usando interligações *full-duplex*. As propriedades de uma EPON são tais que não podemos definir nem como um caso nem como outro, uma vez que esta é uma combinação das duas.

Na direção de *downstream*, ou seja em direção da operadora ao usuário final temos a transmissão feita da OLT para uma ONU e a transmissão é do tipo ponto-a-multiponto (ver figura 7). Neste caso o quadro Ethernet transmitido pela OLT passa através de um *splitter 1:N* (A relação de  $1:N$  situa-se normalmente entre  $1:4$  e  $1:64$ ) e atinge cada ONU. Cada ONU então extrai seu pacote baseado no endereço MAC (*media access control*). Este comportamento é equivalente ao broadcast padrão Ethernet.

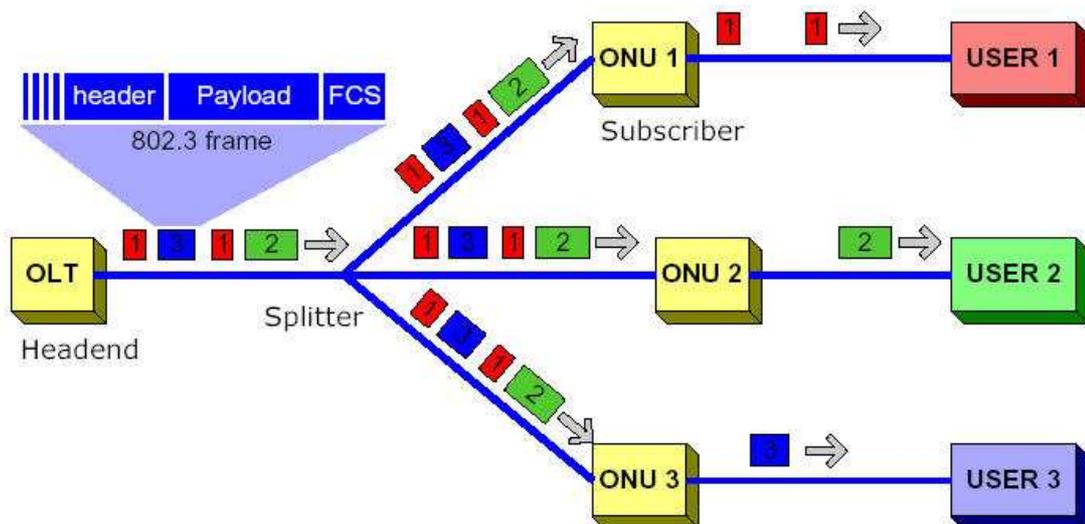


Figura 7 - Tráfego Downstream em EPONs [Pesavento, 2011]

Na direção de *upstream*, ou seja em direção do usuário final para a operadora temos a transmissão feita da ONU para a OLT e a transmissão é do tipo multiponto-a-ponto (ver figura 8). Devido a propriedade direcional do divisor (*combiners* ou *splitters*) o quadro de dados oriundos das ONUs atingirá somente a OLT e não outra ONU.

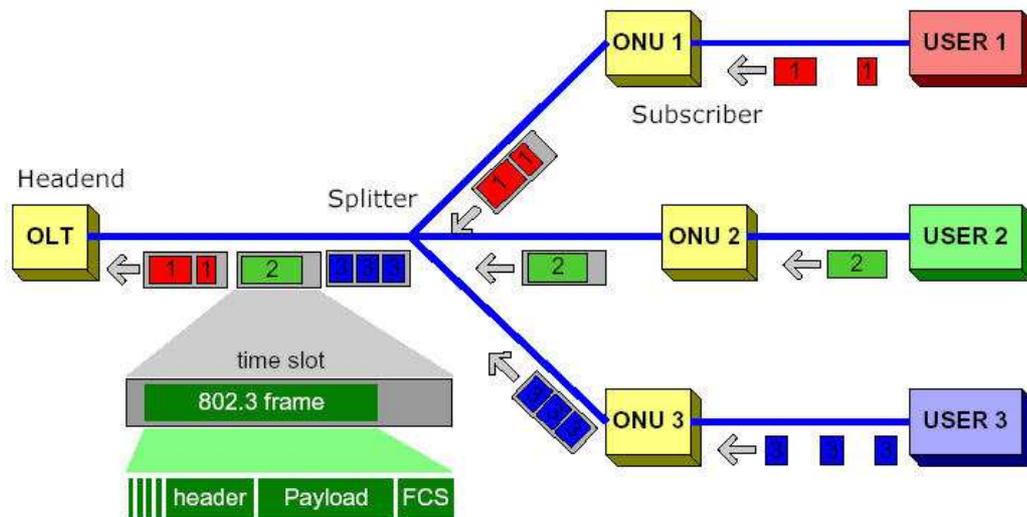


Figura 8 - Tráfego Upstream em EPONs [Pesavento, 2001]

Tal situação, a ONU não pode comunicar-se com outras ONUs, é uma fonte de incompatibilidade entre a EPON e a arquitetura do Ethernet. Fornecer uma comunicação entre as ONUs envolveria usar ao menos a camada de rede do modelo de referência da OSI na OLT. Esta situação é claramente contrastante com os padrões existentes [NOW05].

Kramer et al. [Kramer, 2002] introduziram uma sub-camada especial que ajuda a resolver este problema de compatibilidade e assegura a integração perfeita das EPONs com outras redes Ethernet. A operação desta sub-camada é baseada em marcar os quadros Ethernet (*Ethernet frames*) com rótulos de identificação de enlace (*link ID Tags*). Cada ONU é atribuído um rótulo único que é transmitido no preâmbulo antes de cada quadro.

## 2.6 Por que o padrão Ethernet?

A recomendação do FSAN (ITU G.983 e posterior G.984) definiu uma rede de acesso ótica PON que use o ATM como seu protocolo da camada 2 (APON que evoluiu para BPON). Em 1995, quando esta recomendação começou a ser editada o ATM surgia com grande expectativa de dominar as redes locais as redes metropolitanas e as espinhas dorsais (*backbones*) das redes. Todavia, desde então, esta expectativa não se tornou realidade e a tecnologia Ethernet desbancou a ATM, tornando-se o padrão universal aceito principalmente nas redes locais (com 95% das LANs) [LEE04].

Com o surgimento do padrão Gigabit Ethernet e com o desenvolvimento de produtos comerciais 10 Gigabit Ethernet, mantendo a escalabilidade e facilidade de gerência do padrão original, o padrão Ethernet está ganhando terreno nas MANs e WANs. Logo, se a ATM não tornou-se padrão das LANs e ainda deixou de ser a solução para as MANs e WANs, conclui-se que esta não é a melhor solução para integrá-las.

Um forte movimento tomou força a partir de 2006 [MEF, 2006]. Este movimento é o “*Ethernet Everywhere*”, ou numa livre tradução, “Ethernet em Todo Lugar”. Este movimento mostra a viabilidade do padrão Ethernet para as redes de acesso e de longa distância, ressaltando as vantagens de se ter um único (e simples) padrão em termos de camada de enlace ao longo de toda.

A tabela 4 mostra um comparativo entre as especificações EPON e GPON.

Tabela 4 - Comparativo EPON x GPON [Villalba, 2009]

Arquiteturas	EPON	GPON
Padrão	IEEE 803.ah	ITU-T G.984
Tamanho do pacote de dados	Variável de 64 bytes até 1518 bytes	Variável de 53 bytes até 1518 bytes
Quadro	Ethernet	GFP/ATM
Largura de banda máxima	1 Gb/s	2,5 Gb/s.
Comprimento de onda <i>downstream</i>	1490 nm ou 1510 nm	1480 nm a 1500 nm
Comprimento de onda <i>Upstream</i>	1310 nm	1260 nm a 1360 nm
Tráfego Voz	VoIP ou TDM	TDM
Tráfego Vídeo	1550 nm (RF/IP)	RF/IP
Usuários na PON	16/32	64
Largura de banda média por usuário	60 Mbps/ 30 Mb/s	40 Mb/s

Segundo dados do relatório do *The Linely Group* [Bolaria et Byrne apud TEKNOVUS, 2010] a previsão é que em 2012 existam 13,2 milhões de ONUs EPON instaladas contra apenas 5 milhões de ONUs GPON/BPON. Em termos de OLTs esta relação seria de 1 milhão e cem mil portas EPON contra 310 mil portas GPON.

## 2.7 Redes PON de próxima geração

As redes ópticas passivas até aqui apresentadas são redes cujos padrões estão consolidados e já são realidade de mercado. Operadoras como *China Telecom*, KDDI (Japão), K-Opticom (Japão) e KTT (Coréia do Sul) usam redes EPONs como solução para acesso aos seus assinantes. A Verizon (EUA), Etisalat (Emirados Árabes Unidos) e a Korea SK Broadband (Coréia do Sul) são exemplos de empresas de telecomunicações que oferecem serviços baseados em GPON [TEKNOVUS, 2010].

Diferentemente das EPONs e das GPON que usam o TDM (*Time-Division Multiplexing*) para dividir os canais dos assinantes, existem estudos sobre a utilização de divisão de frequência (WDM - *Wavelength-Division Multiplexing*) para esta multiplexação. A figura 9 mostra um esquema simplificado de uma WDM-PON.

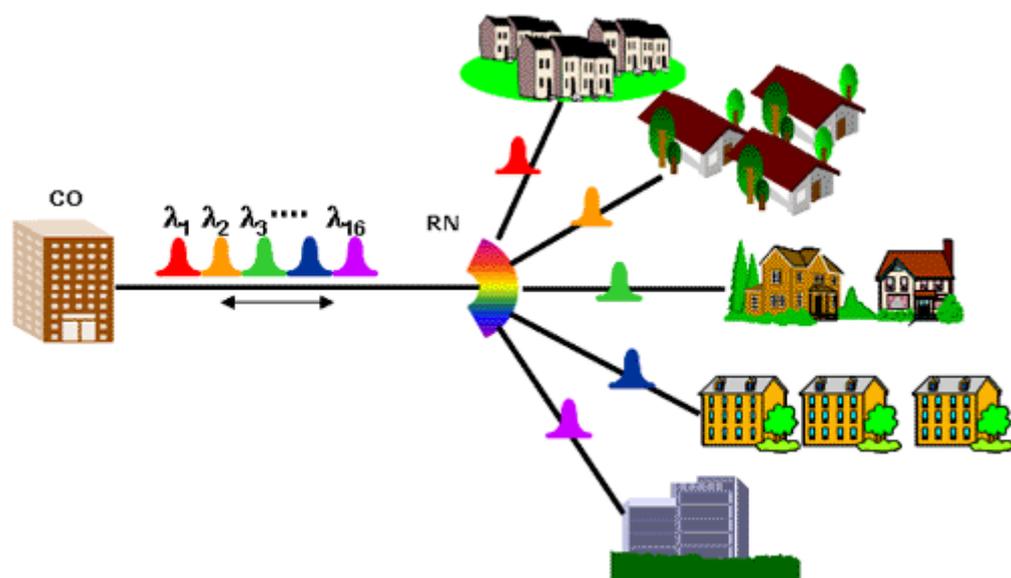


Figura 9 - Esquema simplificado de uma WDM-PON [SOLID, 2011]

Uma nova geração de redes PON (NG-PON - *Next Generation Passive Optical Network*) está surgindo com a idéia de uso misto entre TDM e WDM. Essa nova geração busca também longo alcance (até 100Km) a altas velocidades de transmissão (10Gbps ou mais) com o objetivo de suprir tanto a rede de acesso como a porção metropolitana da rede. Este estudo não irá aprofundar as redes citadas nesta Subseção pois o objetivo principal é melhoria no tráfego de melhor esforço em redes EPON.

# 3

## ALOCAÇÃO DE LARGURA DE BANDA EM REDES ÓPTICAS PASSIVAS ETHERNET

*Este capítulo expõe os esquemas de alocação de largura de banda em Redes Ópticas Passivas Ethernet com seus respectivos parâmetros de sinalização, relaciona as classes de serviços e seus requisitos conforme padrão IEEE 802.1D e ainda faz uma análise do IPACT que servirá de base para a proposta deste trabalho.*

### 3.1 O Protocolo de Controle Multiponto (MPCP)

O padrão IEEE802.3ah definiu dentro dos princípios da camada de controle de acesso ao meio (*Media Access Control – MAC*) o Protocolo de Controle Multiponto (*Multi-Point Control Protocol - MPCP*) que implanta um mecanismo para transportar dados de controle entre as ONUs e as OLTs. Este protocolo serve para prover informações sobre a carga da ONU e outros parâmetros que devem ser usados no esquema de alocação de largura de banda. O múltiplo acesso ao meio definido na norma IEEE802.3ah é baseado em multiplexação por divisão do tempo (TDM), todavia esta não define como deve ser o esquema de alocação de intervalos de tempo (*time slots*) a ser adotado.

O MPCP, cuja versão final é de Junho de 2004, foi desenvolvido para carregar dados de controle entre as OLTs e as ONUs de modo a facilitar a implantação de vários esquemas de alocação dinâmica de largura de banda (*Dynamic Bandwidth Allocation - DBA*). O MPCP opera em dois modos: o modo regular e o modo autodescoberta. No modo autodescoberta o protocolo usa três mensagens de controle: *REGISTER*, *REGISTER\_REQUEST*, *REGISTER\_ACK*. Estas mensagens são usadas para verificar se a ONU está ativa, para

registrar uma nova ONU e negociar parâmetros da nova ONU registrada [Sherif, 2004]. Neste trabalho o foco é a análise de desempenho durante o processo de funcionamento regular de uma rede óptica passiva Ethernet, portanto não se entrará em maiores detalhes da operação autodescoberta do MPCP.

Na operação regular o MPCP depende de duas mensagens de controle Ethernet (GATE e REPORT) para fornecer a infraestrutura de sinalização (plano de controle) para coordenar a transmissão de dados de subida. A OLT gera no sentido da descida (*downstream*) mensagens GATE para atribuir dinamicamente janelas de tempo (*timeslots*) para a ONU ativa. Uma mensagem GATE contém o momento em que uma ONU está autorizada a iniciar a sua transmissão e a duração desta janela de transmissão (*timeslot*). Cabe a cada ONU coordenar suas filas ativas para priorizar o acesso ao meio durante este intervalo de tempo alocado [Zahr e Gragnaire 2006]. Na Figura 10 apresenta-se a estrutura do quadro MPCP. O comprimento total do pacote é de 64 octetos. Este comprimento tem suas raízes nas limitações impostas pela camada MAC. O campo do cabeçalho consiste em um endereço de destino do tamanho de 6 octetos (DA), um endereço da fonte de tamanho de 6 octetos (SA) e em um campo chamado Tamanho/Tipo (*Length/Type*), de 2 octetos, que indica o tipo do quadro Ethernet. Para o MPCP o valor do campo de *Length/Type*. Para o MPCP o valor do campo de *Length/Type* é ajustado a "88 - 08" na notação hexadecimal. A informação específica do MPCP é carregada dentro da parte referente ao *Logical Link Control* (LLC).

O LLC consiste nos campos obrigatórios OPCODE e TIMESTAMP e em campos opcionais adicionais cuja presença depende do tipo de mensagem. O campo OPCODE tem o tamanho de 2 octetos e é usado para distinguir o tipo da mensagem MPCP no sub-nível MAC. Cada pacote deve também conter um campo de TIMESTAMP de 4 octetos. A informação sobre o valor do contador da EPON é carregada dentro deste campo e seu valor é usado para calcular o *Round Trip Time* (RTT) de um pacote de controle entre a OLT e uma ONU. Este

valor será usado mais tarde no mecanismo de alocação da largura de banda e limita o comprimento mínimo do ciclo. O valor do contador é usado também para sincronizar a ONU ao *clock* comum.

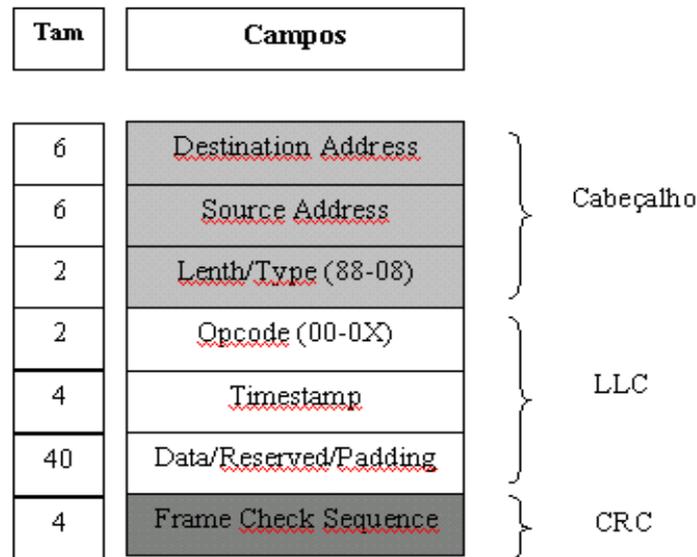


Figura 10 - Estrutura do Quadro MPCP

O comprimento total dos campos opcionais deve ser de 40 octetos. O “Padding” é usado para atingir este tamanho, caso o comprimento total dos campos opcionais não o atinja naturalmente, e consiste em octetos onde todos os bits são iguais a zero. O quadro é sempre fechado pelo campo FCS (*frame check sequence*) que contém o valor da verificação de redundância cíclica (*Cyclic Redundancy Check* - CRC) calculada para DA, SA, campo de *Length/Type*, LLC e *Padding*.

Para facilitar esta coordenação o MPCP estampa cada mensagem GATE que chega a uma ONU com um clock local (*timestamp*), que posteriormente é usado por outras ONUs para sincronia dos clocks de modo a evitar potenciais desvios temporais. A janela de transmissão pode incluir vários quadros Ethernet de tamanhos variáveis. No intervalo de tempo então alocado para a ONU e dependendo também do número de pacotes (quadros Ethernet) guardados no buffer da ONU, uma mensagem REPORT seguida dos quadros de dados do usuário é enviada no sentido de subida (*upstream*).

Tipicamente esta mensagem REPORT contém o tamanho necessário para o próximo intervalo de tempo (*timeslot*) calculado com base na ocupação do buffer da ONU. Após receber as mensagens REPORT das ONUs a OLT passa a solicitação de cada uma destas ao módulo do DBA que será responsável pela divisão da largura de banda.

Na figura 11 o tempo de espera ( $T_{espera}$ ) representa o intervalo entre uma mensagem REPORT enviada pela ONU ( $t_2$ ) e a resposta GATE recebida da OLT pela mesma ONU ( $t_3$ ) relativa a esta solicitação. Neste tempo tem-se o atraso da transmissão de *upstream*, de *downstream* e o tempo computacional que o DBA leva para calcular os dados a serem enviados na mensagem GATE. O esquema mostra a situação de uma única ONU, evidentemente em múltiplas ONUs o ciclo total da OLT se baseia também no número de ONUs atendidas.

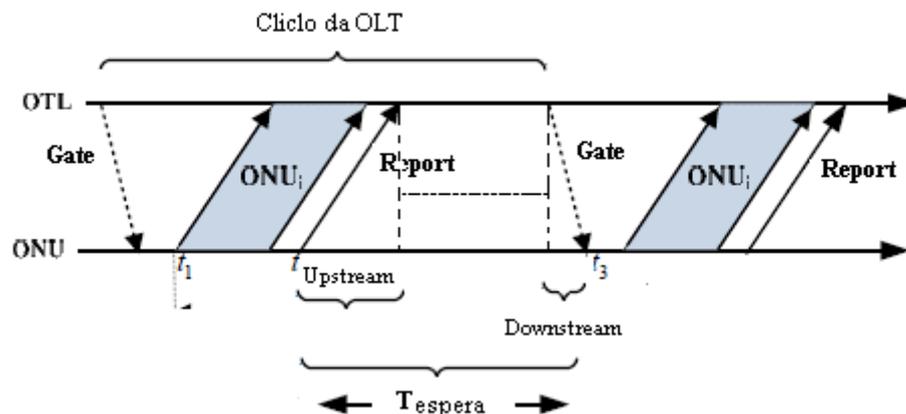


Figura 11 - Princípio de Funcionamento das mensagens GATE e REPORT

Nota-se aqui que o MPCP é independente do DBA, este serve apenas para passar parâmetros que servirão de base para definir como alocar a largura de banda de acordo com seu próprio algoritmo. A alocação de largura de banda em geral é implementada tendo como base uma disciplina de serviço de filas. Uma disciplina de serviço teórica desenvolvida para compartilhar a capacidade de comunicação de links sobrecarregados, de uma maneira eficiente, justa e flexível é o GPS (*Generalized Processor Sharing*). Não é possível

implementar o GPS de maneira exata uma vez que este assume tráfego “fluido” (pacotes infinitesimais). O GPS funciona então como uma espécie de “benchmark” para avaliar disciplinas de serviços realmente implantadas. Disciplinas como o WFQ (*Weighted Fair Queueing*) (enfileiramento balanceado por peso) atinge satisfatoriamente performances equivalentes ao GPS. Em 2002 Kramer e Mukherjee propuseram o IPACT (*Interleaved Polling with Adapting Cycle Time*) que é um esquema de alocação de largura de banda estatístico para as ONUs no sentido de subida baseado no WFQ.

### 3.2 O IPACT

O IPACT é um processo de enfileiramento que usa estratégia de monitoramento intercalado (Figura 12). Por exemplo, a ONU<sub>i</sub> é monitorada pela OLT enquanto a ONU<sub>i-1</sub> envia seus dados de usuário para esta. No sentido de facilitar este enfileiramento a ONU deve gerar sua própria mensagem de controle que é anexada aos dados de transmissão do usuário. Assim uma determinada ONU informa à OLT quantos bytes estavam em seu buffer no momento da última transmissão, através de uma mensagem anexada à transmissão regular de dados do usuário. Fazendo isto, a largura de banda é dinamicamente alocada para cada ONU de acordo com a ocupação do seu buffer [Kramer, 2002].

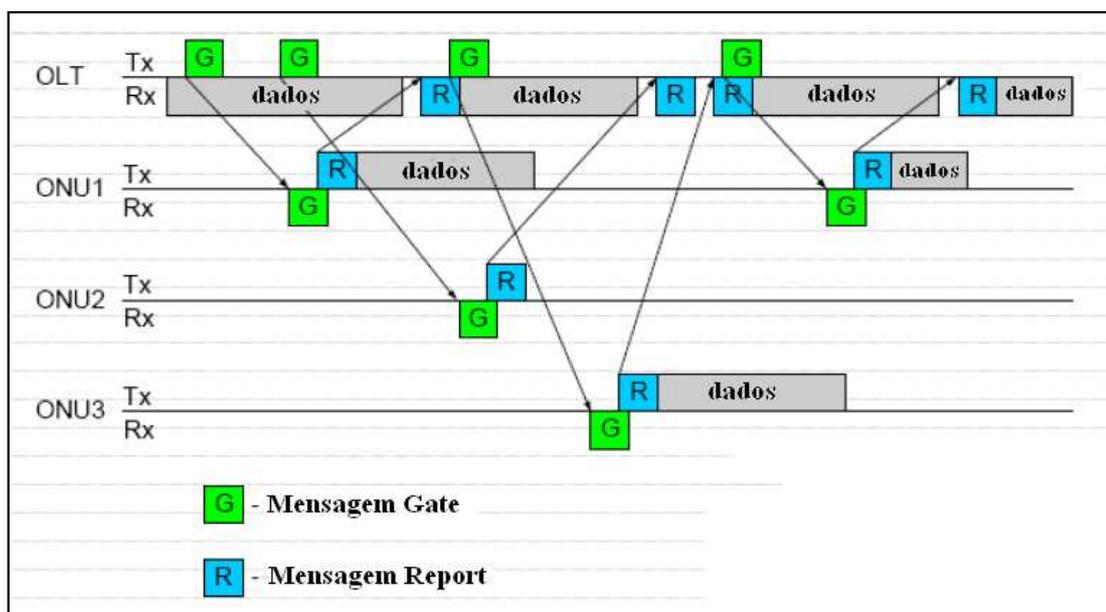


Figura 12 - Esquema GATE e REPORT no IPACT [Villalba, 2009]

Uma ONU que esteja temporariamente sem permissão de transmissão durante um determinado ciclo ainda assim é monitorada pela OLT. Esta ONU está apta a informar a ocupação de seu buffer para o próximo ciclo. Por convenção, a transmissão de um quadro de usuário que não caiba no seu intervalo de tempo é adiada para o próximo intervalo. Para evitar que um canal de subida seja monopolizado por uma ONU com carga muito alta, o IPACT determina uma janela de transmissão máxima ( $W_{max}$ ) para cada ONU. Definido um  $W_{max}$  obtém-se então o tempo máximo do ciclo de *polling* ( $T_{max}$ ) quando a ONU está sob carga máxima:

$$T_{max} = \sum_{i=1}^N \left( G + \frac{8 \times W_{max}}{R_u} \right) \quad (1)$$

onde  $G$  é o intervalo de espera entre slots adjacentes (o IEEE 802.3ah define este valor em 5ms, mas existem estudos para redução para 1ms),  $R_u$  é a taxa do usuário até a ONU (bps) e  $N$  é o número de ONUs atendidas pela OLT.

É definida também uma banda mínima garantida para a ONU ( $\Lambda_{min}$ ) dada por:

$$\Lambda_{min} = 8 \times \frac{W_{max}}{T_{max}} \quad (2)$$

### 3.3 CLASSES DE SERVIÇOS.

Para dar suporte à Classe de Serviços (*Class of Services – CoS*), as redes Ethernet devem ser capazes de classificar o tráfego e fornecer tratamento diferenciado para cada classe. Isto foi conseguido com a introdução de duas novas extensões no padrão: P802.1p (posteriormente anexado ao P802.1D) e P802.1q [Kramer, 2002].

O padrão 802.1D diferencia as seguintes classes de serviços:

- 1) **Controle da Rede** (*Network Control*): caracterizado por “deve chegar lá” (*must get there*) para manter a infraestrutura da rede. Caso as aplicações de controle não estiverem operando apropriadamente o desempenho das demais aplicações pode ser seriamente prejudicado.
- 2) **Voz** (*Voice*): caracterizado por um atraso máximo de 10 ms.
- 3) **Vídeo** (*Video*): caracterizado por um atraso máximo de 100 ms.
- 4) **Carga Controlada** (*Controlled Load*): aplicações importantes sujeitas a alguma forma de “controle de admissão”.
- 5) **Excelente Esforço** (*Excellent Effort* ou *CEO Effort*): serviços tipo melhor-esforço que a organização deverá fornecer aos seus clientes mais importantes.
- 6) **Melhor Esforço** (*Best Effort*): tráfego comum da LAN como se conhece hoje em dia.
- 7) **Tráfego de Fundo** (*Background*): transferências de massa e outras atividades que são permitidas na rede, mas que não devem afetar o uso por outros usuários e aplicações.

Se um elemento ativo da rede tiver menos de sete filas, algumas das classes de tráfego devem ser agrupadas. A Tabela 5 mostra o padrão recomendado para o agrupamento de classes de tráfego.

Tabela 5 - Tipo de Tráfego e Agrupamento em Filas [Kramer, 2002]

Número de Filas	Tipo de Tráfego e Filas Atribuídas						
1	Controle da Rede	Voz	Vídeo	Carga Controlada	Excelente Esforço	Melhor Esforço	Tráfego de Fundo
2	Controle da Rede	Voz	Vídeo	Carga Controlada	Excelente Esforço	Melhor Esforço	Tráfego de Fundo
3	Controle da Rede	Voz	Vídeo	Carga Controlada	Excelente Esforço	Melhor Esforço	Tráfego de Fundo
4	Controle da Rede	Voz	Vídeo	Carga Controlada	Excelente Esforço	Melhor Esforço	Tráfego de Fundo
5	Controle da Rede	Voz	Vídeo	Carga Controlada	Excelente Esforço	Melhor Esforço	Tráfego de Fundo
6	Controle da Rede	Voz	Vídeo	Carga Controlada	Excelente Esforço	Melhor Esforço	Tráfego de Fundo
7	Controle da Rede	Voz	Vídeo	Carga Controlada	Excelente Esforço	Melhor Esforço	Tráfego de Fundo

### 3.4 O IPACT modelado usando teoria de filas

Para caracterizar a ONU usou-se o modelo de dois estágios de filas proposto por Al Zahr e Gagnaire [Al Zahr, 2006] e ratificado por Lannoo et al [Lannoo et al., 2007], com três classes de serviços que são P1 (maior prioridade), P2 (prioridade intermediária) e BE (melhor esforço) (Figura 13). A classificação do tráfego na ONU é feita através da divisão em filas de prioridade (portanto três filas) e o escalonamento pela OLT (segundo estágio) é feito baseado em uma fila FCFS (*first-come-first-served*), ou seja, o primeiro quadro a chegar é o primeiro a ser atendido.

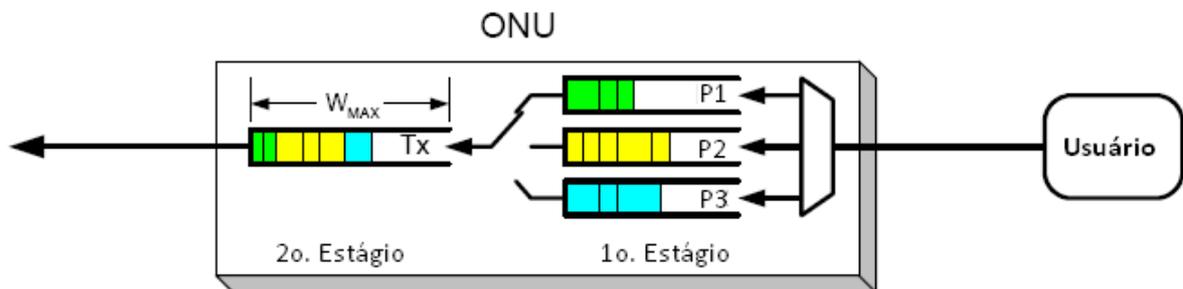


Figura 13 - Modelo em Fila

Devido ao interesse deste estudo ser o atraso total dos quadros e não a eventual perda destes, considerou-se as filas dos tráfegos P1, P2 e BE como filas infinitas, ou seja, o buffer da ONU é significativamente grande em comparação a quantidade de quadros armazenados por estas filas. A chegada do tráfego possui distribuição exponencial negativa e cada fila tem uma cota de serviço denominada  $\varphi_c$ . De modo a alocar mais justamente a largura de banda para as filas considera-se cada cota de serviço proporcional à sua carga de tráfego:

$$\varphi_c = \frac{\lambda_c}{\lambda} \delta_c \quad (3)$$

onde  $\lambda_c$  é a carga da classe de serviço “c” e  $\lambda$  é a carga total da ONU (ou seja  $\lambda = \sum_c \lambda_c$ ) e  $\delta_c$  é o peso dado a cada classe de serviço baseado em sua prioridade ( $\sum \delta_c = 1$ ). A estratégia IPACT

divide a largura de banda alocada para a ONU simultaneamente por todas as filas não-vazias proporcionalmente as cotas de serviço como segue:

$$\mu c = \frac{\varphi c}{\sum_{c \in Q} \varphi c} \times \Lambda \min \quad (4)$$

onde Q significa o número de filas não vazias na ONU. Assume-se também, no modelo, que cada fila é servida em intervalos de tempo distribuídos de maneira exponencial negativa igual a  $1/\mu c$ . Desta forma o primeiro estágio do modelo é uma fila de buffer infinito tipo M/M/1 tendo cada fila uma taxa de chegada igual a  $\lambda_c$  e taxa de serviço  $\mu_c$  [Al Zahr, 2006].

Para filas M/M/1 em estado de equilíbrio o processo de saída gerado por uma entrada Poisson (exponencial negativa) também será Poisson. Assim como a combinação de processos Poisson também resultará em outro processo Poisson [Baynad, 2000 apud Al Zahr, 2006]. Desta forma o segundo estágio também tem um regime de chegada Poisson com taxa igual a  $\lambda$ . A taxa de serviço desta fila é dada por  $\mu = \Lambda_{\min}$  sendo esta fila capaz de atender simultaneamente  $W_{\max}$  quadros. Considera-se, também, que o tempo de transmissão de cada quadro é perfeitamente negligenciável diante do tempo de espera na fila [Al Zahr, 2006]. Desta forma o segundo estágio pode ser modelado como uma fila finita M/M/1/K (onde K é igual à  $W_{\max}$ ).

O IPACT, como será visto na subseção 4.3, proporciona uma melhor alocação de banda para as classes prioritárias, mas, como a maioria dos DBAs propostos recentemente na literatura, relega a importância do tráfego BE a um segundo plano gerando um atraso significativo neste tipo de tráfego. Reduzir esta penalização sofrida pelo tráfego de melhor esforço BE é o objetivo principal desta dissertação e a proposta para obtenção deste objetivo será apresentada no capítulo seguinte.

# 4

## PROPOSTA PARA MINIMIZAR A PENALIZAÇÃO DO TRÁFEGO DE MELHOR ESFORÇO (BE)

*Neste capítulo apresenta-se a proposta principal deste trabalho, iniciando-se com a revisão de trabalhos relacionados, a modelagem e a flexibilidade do modelo criado. Ainda aqui se mostra o processo usado para validar o modelo proposto.*

### 4.1 Trabalhos relacionados

Neste trabalho busca-se investigar aspectos da alocação de largura de banda em EPONs e quais seus impactos nas diversas classes de tráfego suportadas. São muitos os trabalhos recentemente publicados propondo um método mais eficiente para esta alocação principalmente porque o padrão IEEE802.3ah não tem um esquema definido, limitando-se a definir o MPCP (*Multi-Point Control Protocol*) que é um protocolo que transporta dados de controle entre a ONU e a OLT.

O escalonamento IPACT (*Interleaved Polling with Adapting Cycle Time*), proposto por Kramer et al. em 2002 [Kramer, 2002] praticamente inicia os estudos em relação a alocação dinâmica de largura de banda em redes EPON. Ainda atualmente este escalonamento serve de base para as propostas apresentadas nesta área. Kramer et al. propuseram em 2004 [Kramer, 2004] um esquema denominado Enfileiramento Justo com Curvas de Serviço – FQSE (*Fair Queueing with Service Envelopes*). O FQSE é uma política que pressupõe uma relação hierárquica entre os escalonamentos inter-ONU e intra-ONU, tal que a OLT forneça às ONUs um indicador que lhes permita determinar o volume de tráfego de cada fluxo que se

pode transmitir tal que os recursos da rede sejam divididos entre os fluxos de maneira balanceada e, portanto, justa [Pereira, 2007].

O modelo em filas hierárquicas para estudo de EPONs foi usado por Kramer et al. [Kramer, 2004] e modelado para resolução analítica por Al Zahr e Gagnaire [Al Zahr, 2006]. Este modelo serviu de base para a modelagem por Redes de Petri neste estudo.

Outra abordagem foi feita por Pereira et al. [Pereira, 2007], que propuseram uma política denominada Compartilhamento Proporcional com Reserva de Carga (*Proportional Sharing with Load Reservation - PSLR*), com a qual atinge resultados bem próximos do FQSE de Kramer et al. [Kramer, 2004], porém com um custo computacional menor.

Em 2010 Zi-vi e Suo-zhu [Zi-vi, 2010] propuseram um algoritmo de alocação de largura de banda (DBA) baseado em previsão do tráfego compartilhado em EPONs (*Dynamic Bandwidth Assignment Algorithm Share-based the Multiple Traffic Prediction - SMTP*) para garantir a largura de banda às classes de serviços suportadas pelas ONUs no sentido de subida.

Na Tabela 6 tem-se um resumo dos trabalhos aqui relacionados citando observações relevantes em relação a esta dissertação.

Analisando essas pesquisas, verifica-se que a questão do escalonamento em redes EPON ainda possui aspectos em aberto. Percebe-se, também, em todos esses estudos, que o tráfego de melhor esforço (BE) é sempre negligenciado. Como visto na sessão 1.2 o tráfego desta classe ainda representa uma parcela significativa do tráfego mundial em redes IP e segundo previsão da CISCO [CISCO, 2010] nos próximos três anos ainda representará pelo menos 40% do total trafegado nas redes mundiais. Desta forma, buscou-se neste trabalho minimizar a penalização do tráfego de melhor esforço, deixando as classes de tráfego superiores dentro de seus limites de exigência de qualidade de serviço (QoS).

Tabela 6 - Resumo dos trabalhos aqui relacionados

<b>Autor</b>	<b>Proposta</b>	<b>Obs:</b>
Kramer et al. (2002)	IPACT – um algoritmo dinâmico de alocação de largura de banda em contrapartida aos algoritmos estáticos	O IPACT serviu como referência para a proposta deste trabalho.
Kramer et al. (2004)	FQSE – algoritmo hierárquico entre os escalonamentos inter-ONU e intra-ONU	O FQSE divide escalonamento entre inter-ONU e intra-ONU semelhante ao proposto no modelo de filas de dois estágios deste trabalho
Al Zahr e Gagnaire (2006)	Modelo Analítico para o protocolo MAC do 803.11ah	Modelou o IPACT em Filas
Pereira et al (2007).	PSRL – Modelo baseado em Reserva de Carga	Usa o GATE e REPORT para previsão da próxima carga da ONU. Resultados próximos ao obtido pelo FQSE.
Zi-vi e Suo-zhu (2010)	SMTP - DBA baseado em previsão do tráfego compartilhado em EPONs	Baseia-se também em previsão de carga da ONU para a próxima transmissão. Faz comparação com algoritmos tradicionais de alocação de largura de banda.

## 4.2 O Modelo em Rede de Petri

O formalismo a que se chama de redes de Petri possibilita a representação de sistemas dinâmicos a eventos discretos, com atividades concorrentes e assíncronas [Menascé, 2003]. Entretanto, originalmente estas redes não permitiam analisar questões relacionadas com o tempo. Com o passar do tempo novas funcionalidades foram adicionadas às redes de Petri originais gerando o que se chama comumente de redes de Petri de alto nível. Essas funcionalidades foram acrescentadas para resolver mais facilmente diversos tipos de problemas. Assim, surgiram as redes estocásticas (uma subdivisão das redes de Petri temporizadas) e as redes de Petri coloridas [Menascé, 2003].

Em uma rede de Petri tradicional, *tokens* são indistinguíveis. Em uma rede de Petri colorida, cada *token* possui um valor. Em várias ferramentas para redes de Petri coloridas, os valores dos *tokens* são tipados, e podem ser testados e manipulados usando uma linguagem de programação funcional. As redes de Petri estocásticas são uma derivação de redes de Petri temporizadas, que adicionam tempos não-determinísticos através de aleatoriedade ajustável nas transições. A distribuição exponencial é utilizada para temporizar essas redes. As redes de Petri estocásticas podem ser combinadas com as redes de Petri coloridas.

Para modelar a rede aqui proposta usou-se a ferramenta DaNAMiCS (*Data Network Architecture: Modelling Concurrent Systems*) desenvolvida no Departamento de Ciência da Computação na Universidade da Cidade do Cabo, na África do Sul, pelos pesquisadores B.Changuion, I.Davis e M.Nelte [DaNAMiCS, 2009]. Esta ferramenta permite modelar redes de Petri estocásticas coloridas e é disponibilizada gratuitamente. O modelo de fila convertido para rede de Petri resultou no esquema mostrado na Figura 14. O detalhamento do processo de construção deste modelo pode ser visto no Anexo I.

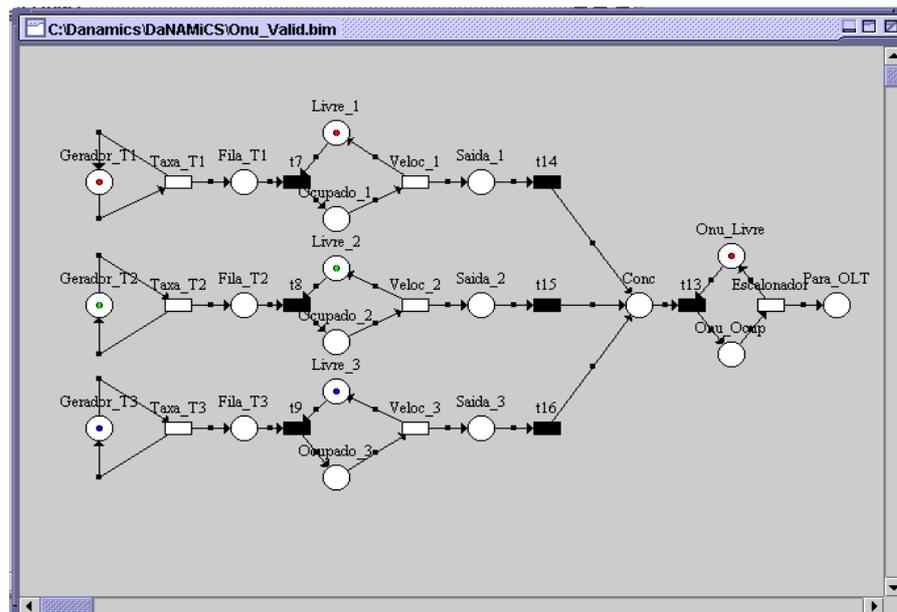


Figura 14 - Modelo em Rede de Petri Estocástica Colorida

A ferramenta permite simular um número de iterações bastante alto com baixo tempo de processamento. No caso aqui apresentado as simulações foram de um milhão de iterações, que equivalem a um tempo de 200 segundos de trabalho na ONU, e levaram em média apenas 10 segundos de tempo de simulação. O valor de um milhão de iterações foi escolhido após sucessivos incrementos até obter-se um valor que estabilizou os resultados. A estabilização ocorre após um número significativo de iterações, pois é necessário compensar o período de aquecimento (*warm-up*) do modelo.

A ferramenta fornece entre seus resultados o tamanho médio da fila em cada lugar da rede (Figura 15).

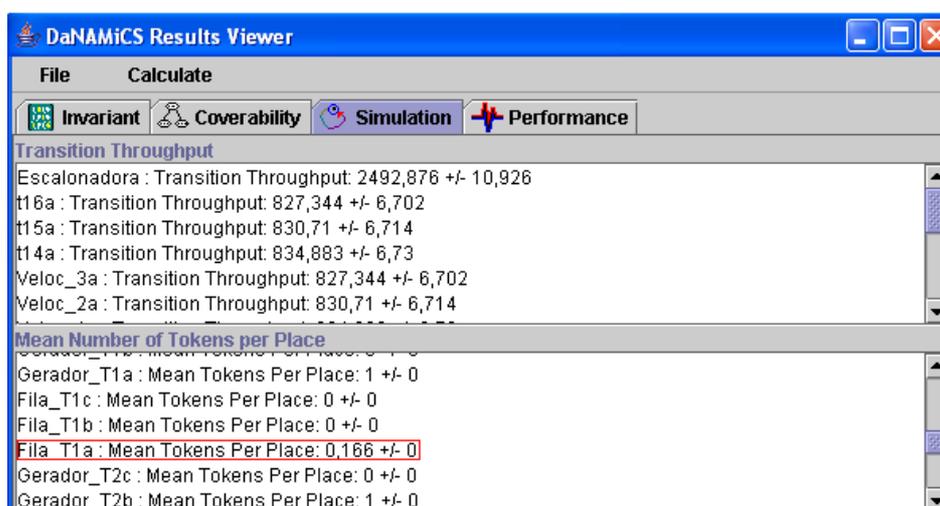


Figura 15 - Resultados da simulação com ênfase no tamanho da fila

Utilizando-se este resultado calculou-se o atraso<sup>3</sup> total dos quadros aplicando as fórmulas de Teoria de Filas [Menascé, 2003]. O atraso total é dado pela parcela de espera na fila adicionado a parcela do tempo de atendimento. O tempo de atendimento evidentemente não depende do tamanho da fila, apenas da taxa de serviço. Na parcela do tempo de espera na

<sup>3</sup> Existem outros parâmetros para definir a qualidade de serviço oferecida, todavia como o foco desta dissertação é a tráfego BE, o atraso é mais significativo para os dados tráfegados nesta classe (HTTP, FTP, POP, SMTP entre outros) que, por exemplo, a variação deste (Jitter).

fila as fórmulas foram manipuladas de forma que o tempo total no sistema (atraso) ficasse em função do tamanho da fila. No primeiro estágio a fila é M/M/1, então:

$$T = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (5)$$

e

$$NF = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (6)$$

onde T é o tempo total no sistema, NF é o tamanho da fila e  $\mu$  e  $\lambda$  são respectivamente as taxas de serviço e de chegada no sistema.

No segundo estágio onde a fila é M/M/1/K tem-se:

$$T = \frac{K}{\lambda} - \frac{(\lambda + \mu)(1 - P_0)}{\lambda^2} + \frac{1}{\mu} \quad (7)$$

e

$$NF = K - \frac{(\lambda + \mu)(1 - P_0)}{\lambda} \quad (8)$$

onde K é o tamanho do *buffer* e  $P_0$  é a probabilidade de termos zero elementos no sistema.

Manipulando as fórmulas pode-se obter o tempo total de atraso em cada fila. No primeiro estágio:

$$T = NF \cdot \frac{\mu}{\lambda^2} \quad (9)$$

e no segundo estágio:

$$T = \frac{NF}{\lambda} + \frac{1}{\mu} \quad (10)$$

#### 4.2.1 A FLEXIBILIDADE DO MODELO

Para modelar a ONU aqui apresentada usaram-se como parâmetros os dados da Tabela 7.

Quando converteu-se este modelo para Rede de Petri todas essas grandezas foram baseadas em quadros, ou seja, tamanhos foram convertidos de bytes para quadros e taxas e velocidades para quadros por segundo. Para isso o tamanho padrão do quadro utilizado foi de 1500bytes.

Tabela 7 - Parâmetros do Modelo

Símbolo	Parâmetro	Valor	OBS
N	Número do ONUs	16	
n	Número de classes de tráfego	3	Mesmo número de filas no estágio 1.
$R_u$	Taxa de transmissão usuário- ONU	100Mbps	
$R_n$	Taxa de transmissão da EPON	1000Mbps	
L	Distância máxima ONU-OLT	20Km	Para considerar o tempo de transmissão desprezível.
B	Tempo de espera entre slots adjacentes	5ms	O IEEE estuda a possibilidade de reduzir este tempo para 1ms.
$W_{max}$	Tamanho máximo do slot de tempo	15000 bytes	
$T_{max}$	tempo máximo do ciclo de <i>polling</i>	2ms	Calculado por (1)

No modelo proposto por Al Zahr e Gagnaire [Al Zahr, 2006] foi modelada somente uma ONU então toda a resolução baseia-se em que todas as ONUs servidas pela OLT tenham o mesmo nível de acordo de serviço (SLA).

Com a facilidade de replicar a ONU representada em redes de Petri e modelada no DaNAMICS nesta dissertação, o modelo apresentado serve para fazer análises com ONUs com diferentes SLAs o que pode ser bastante útil devido a heterogeneidade dos clientes que uma OLT pode atender na prática.

#### 4.2.2 VALIDAÇÃO DO MODELO

Para validar o modelo fez-se uma simulação com os parâmetros idênticos aos parâmetros utilizados por Sawsan Al Zahr e Maurice Gagnaire [Al Zahr e Gagnaire, 2006] em

sua proposta de solução analítica. Os resultados obtidos pelo modelo aproximaram-se satisfatoriamente dos resultados obtidos no artigo citado (Figuras 16 e 17).

Na nomenclatura que usou-se neste trabalho a carga P1, P2 e BE são respectivamente equivalentes aos tráfegos EF, AF e BE de Al Zahr e Gagnaire [Al Zahr e Gagnaire, 2006]. Os pesos de prioridade destes tráfegos são respectivamente 3, 2 e 1, ou seja, o tráfego P1 (EF) tem três vezes mais prioridade que o tráfego BE e o tráfego P2 (AF) tem duas vezes mais prioridade que o mesmo tráfego BE.

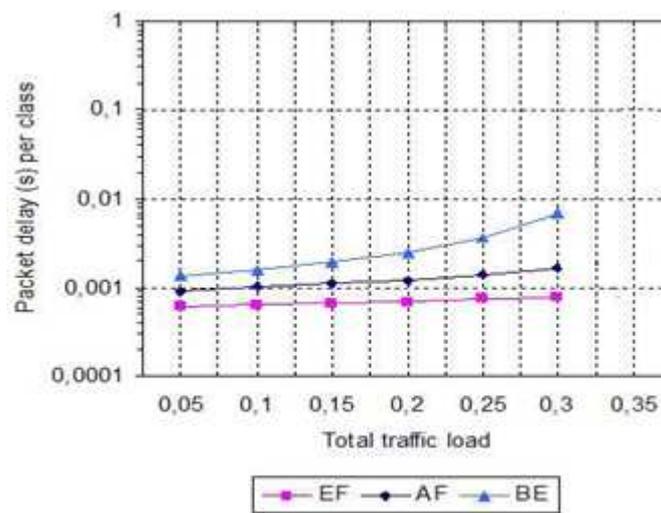


Figura 16 - Reprodução parcial dos resultados obtidos por Al Zahr e Gagnaire [Al Zahr, 2006]

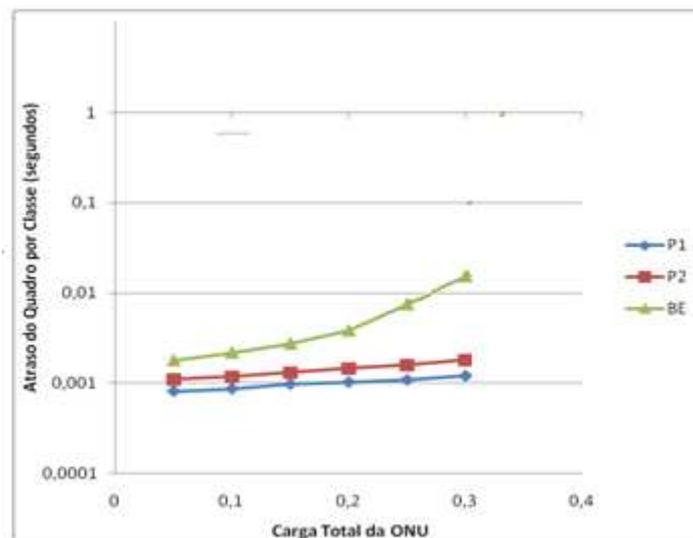


Figura 17 - Resultados obtidos neste trabalho com parâmetros idênticos aos de Al Zahr e Gagnaire

### 4.3 A penalização do Tráfego de Melhor Esforço (BE)

Para demonstrar a penalização do tráfego de melhor esforço (*Best Effort* – BE), previamente constatada nos trabalhos recentemente publicados executou-se uma simulação e posterior cálculo do atraso total dos quadros com a carga da ONU atingindo até 40% de sua carga total e com cada classe de serviço igualmente distribuída na utilização da banda de subida da ONU (Figura 18).

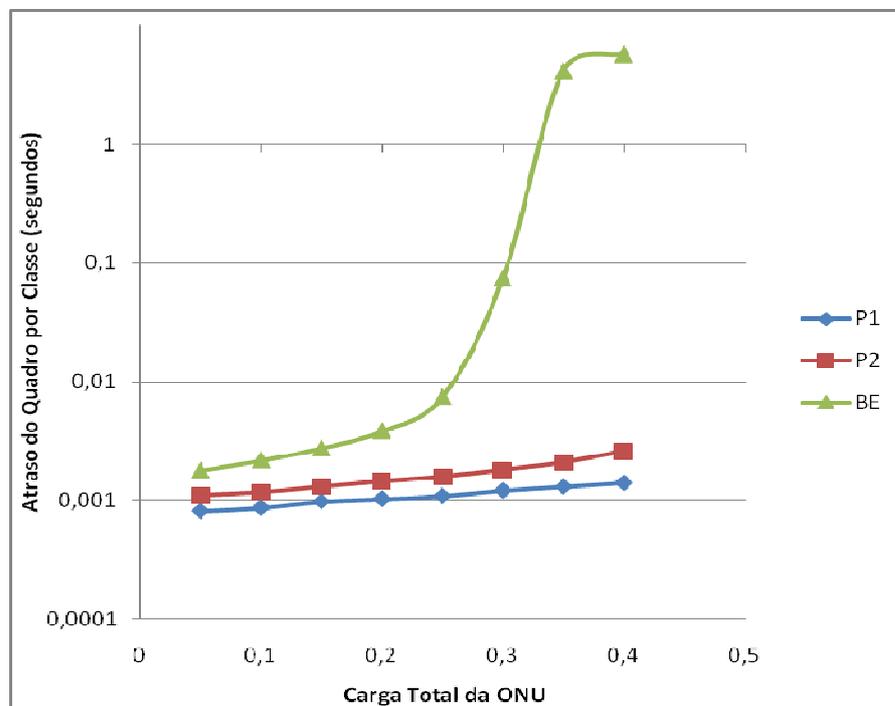


Figura 18 - Demonstração da penalidade do tráfego BE

Como se pode notar pelo resultado o tráfego BE começa a sofrer penalização muito alta quando a carga da ONU cresce. O atraso atinge, na configuração aqui simulada, a casa da dezena de segundos quando a carga ultrapassa 35% da capacidade total.

O atraso neste tipo de tráfego pode chegar a valores no qual mesmo as aplicações tradicionais baseadas no TCP, ficam comprometidas em função do estouro de tempo destas (*Time Out*).

Matematicamente, através do modelo de filas, pode-se entender que este aumento substancial se dá quando a carga do tráfego BE ( $\lambda_{BE}$ ) se aproxima ou até ultrapassa a capacidade de atendimento dada pelo DBA para ela ( $\mu_{BE}$ ). Caso fosse analisada separadamente a fila BE estaria aproximando-se da instabilidade que, segundo a teoria de filas, é atingida quando  $\lambda > \mu$ .

#### 4.4 Minimizando a penalização do BE

Como se viu na seção anterior, o tráfego BE sofre penalização significativa quando a largura de banda alocada pelo IPACT para este é menor que o tráfego deste tipo gerado na ONU. Esta situação ocorre, pois no IPACT o escalonamento baseado no peso não leva em consideração este parâmetro (4). Aqui se propõe que o  $\mu_{BE}$  seja calculado (pela equação 4) e comparado a  $\lambda_{BE}$ . Caso este seja menor então as larguras de bandas são redistribuídas conforme a seguir:

$$\mu_{BE} = 1,02 \times \lambda_{BE} \quad (11)$$

e

$$\mu_C = \frac{\varphi_C}{\sum_{C \in Q} \varphi_C} \times \Lambda_{SOBRA} \quad (12)$$

onde  $\Lambda_{SOBRA}$  é dado por

$$\Lambda_{SOBRA} = \Lambda_{min} - \mu_{BE} \quad (13)$$

A constante “1,02” que representa um acréscimo de 2% no  $\mu_{BE}$  (equação 11) em relação ao  $\lambda_{BE}$  foi obtida através de simulação de aumento gradual de 0,5% em cada nova simulação. Até o aumento de 1,5% o ganho no tráfego BE se mostrou insignificante. Quando atingiu-se os 2% os resultados obtidos foram satisfatórios (o que poderá ser verificado no capítulo 5 deste trabalho). Um aumento de 2,5% começa a comprometer os tráfegos que devem ter maior privilégio na rede em função de sua necessidade de serviço.

# 5

## ANÁLISE DOS RESULTADOS

*Neste capítulo faz-se a análise dos resultados obtidos com este trabalho. Primeiramente mostram-se os cenários usados, em seguida os resultados para, então, finalizar com uma análise comparativa da proposta.*

### 5.1 Cenários

Para este novo esquema de alocação de largura de banda foram feitas as simulações levando em consideração três cenários de divisão da utilização do canal da ONU pelos tráfegos P1, P2 e BE, conforme a Tabela 8. As prioridades dos tráfegos são as mesmas explicitadas na Subseção 4.2.1, ou seja, P1 tem peso 3, P2 peso 2 e BE peso 1.

Tabela 8 - Cargas de Tráfego nas ONUs

Cenário	Carga P1	Carga P2	Carga BE
1	20%	30%	50%
2	33%	33%	33%

A escolha destes cenários deu-se com objetivo de cobrir três situações que podem surgir na rede com relação ao tráfego BE.

No cenário 1, no qual o tráfego BE representa 50% da carga total da ONU, tem-se uma reprodução muito próxima do cenário atual da carga deste tráfego nas redes IPs globais [CISCO, 2010]. No Cenário 2 uma projeção na qual apenas um terço da rede teria este tráfego o que pode ser considerado plausível para depois de 2014 (conforme mostrado na Subseção 1.2).

No último cenário tem-se uma projeção pessimista em relação a este tráfego no qual ele se torna apenas 20% do tráfego. Este último cenário foi escolhido para testar os efeitos da melhoria proposta mesmo em situação extrema de predominância de tráfego de classes prioritárias (o que não é previsto pelo menos para os próximos 3 anos [CISCO, 2010]).

## 5.2 Resultados

Nas subsecções seguintes apresentam-se os resultados obtidos com a nova proposta comparando-as com os resultados obtidos usando o IPACT.

### 5.2.1 CENÁRIO 1

Neste cenário, usando o IPACT, nota-se que com cargas superiores a 25% da carga total da ONU o tráfego BE atinge a casa de atraso próximo a 10 segundos (figura 19)

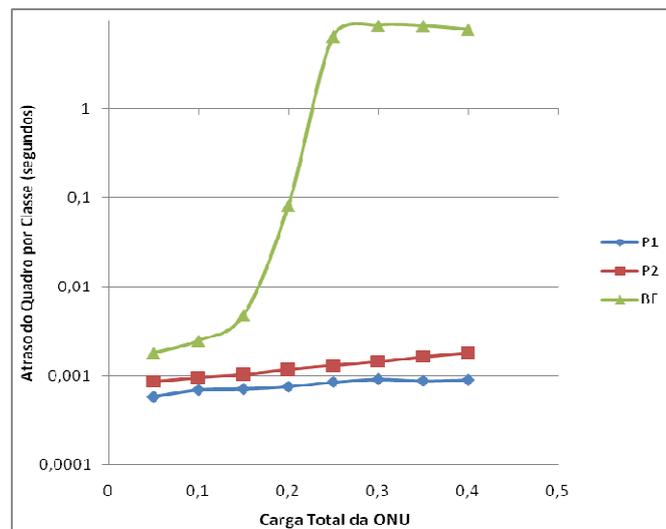


Figura 19 - Desempenho do IPACT no cenário 1

Usando-se a proposta deste trabalho (Figura 20) conseguiu-se manter, no intervalo estudado (até 40% da carga total da ONU), o tráfego BE com atrasos inferiores a 0,1 segundo e o atraso na classe P1 atingiu valores pouco superiores a 1ms (um milissegundo). A classe P2 ficou abaixo de 10 milissegundos. Comparando-se estes valores com os valores recomendados pelo padrão IEEE802.1D (Subseção 3.3) nota-se que o atraso dos tráfegos P1 e P2 estão compatíveis com as classes de voz e vídeo.

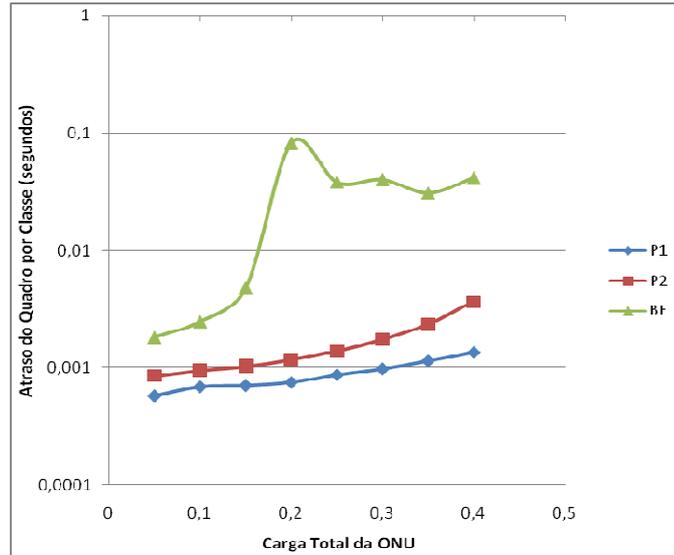


Figura 20 - Desempenho da proposta de melhoria do IPACT no cenário 1

### 5.2.2 CENÁRIO 2

Neste cenário, usando o IPACT, o tráfego BE começa a ficar seriamente prejudicado a partir de 35% da carga total da ONU (Figura 21)

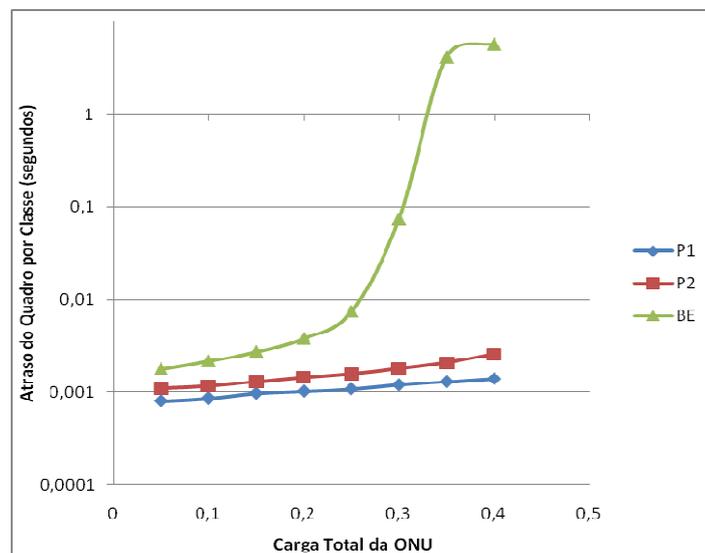


Figura 21- Desempenho do IPACT no cenário 2

Usando-se a proposta deste trabalho (Figura 22) conseguiu-se manter, no intervalo estudado (até 40% da carga total da ONU), o tráfego BE com atrasos inferiores a 0,1 segundo e o atraso na classe P1 e P2 atingiram valores superiores a 1ms (um milissegundo). Mesmo assim na carga de 40% atraso da classe P2 ficou em torno de 5 milissegundos e o da classe P1 pouco acima de 2 milissegundos.

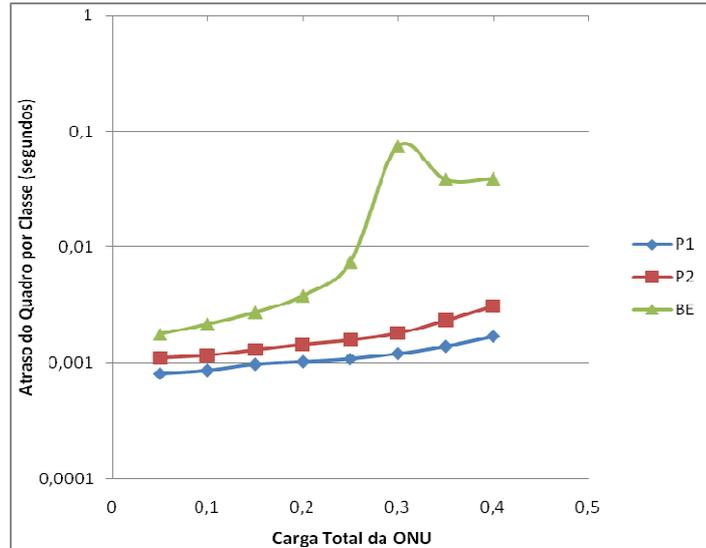


Figura 22 - Desempenho da proposta de melhoria do IPACT no cenário 2

### 5.2.3 CENÁRIO 3

Neste cenário como a carga do BE é bem menor que nos outros cenários estudados (20% do total da carga das ONU) esta classe só começa ser prejudicada em patamares acima de 60% da carga total da ONU (Figura 23).

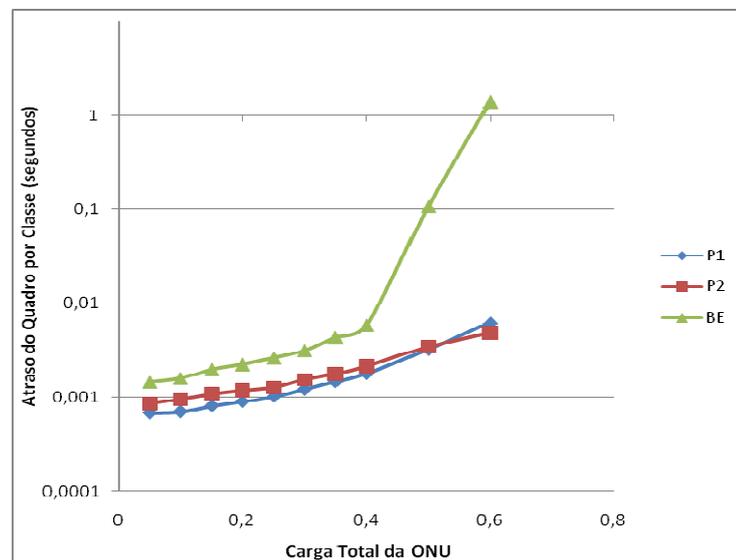


Figura 23 - Desempenho do IPACT no cenário 3

Aplicando-se neste cenário a proposta deste trabalho (Figura 24) o atraso do tráfego BE manteve-se próximo ou abaixo de 0,1 segundo até uma carga de 60% do total da capacidade da ONU.

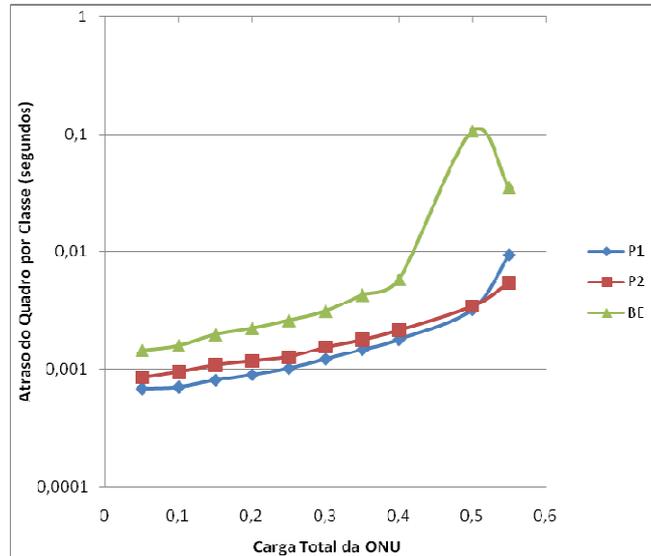


Figura 24 - Desempenho da proposta de melhoria do IPACT no cenário 3

Vale ressaltar que a partir dos 50% a penalização do tráfego P1 (de maior prioridade) ultrapassa a penalização do tráfego P2 (prioridade intermediária). Mesmo assim o atraso total dessas duas classes (P1 e P2) ainda é inferior a 10 milissegundos o que, segundo a norma IEEE802.1D (sessão 3.3), é compatível para tráfego de voz e vídeo.

O cenário 3 aqui apresentado foi estudado para verificar o comportamento da melhoria proposta numa situação na qual o tráfego de melhor esforço é tipicamente pequeno em relação aos demais tráfegos. Esta situação, em termos de tráfego global em redes IP [CISCO, 2010], é uma situação que pouco espelha a realidade das redes para os próximos anos.

### 5.3 Análise dos resultados

Analisando os três cenários estudados, nota-se que o IPACT melhorado, proposto neste estudo, reduz significativamente a penalidade do tráfego BE (melhor esforço) sem que o

custo impactado nas classes de maior prioridade seja suficiente para prejudicar tráfego de voz e vídeo segundo parâmetros do IEEE802.1D.

A Tabela 9 mostra comparativamente o percentual de carga na ONU na qual o tráfego BE tem baixa penalização sem prejuízo das classes de tráfego privilegiadas.

Tabela 9 - Comparativo de Utilização da ONU na qual o tráfego BE tem baixa penalização

Cenário	Percentual de utilização da ONU no qual o BE tem baixa penalização sem prejudicar os tráfegos prioritários		Ganho (em pontos percentuais)
	IPACT Tradicional	IPACT Melhorado	
<b>1</b>	20%	40%	<b>20%</b>
<b>2</b>	30%	40%	<b>10%</b>
<b>3</b>	45%	60%	<b>15%</b>

Analisando-se então a Tabela 9 observa-se que com a melhoria proposta no IPACT conseguiu-se aproveitar um maior percentual da carga total disponibilizada para a ONU sem prejudicar os tráfegos prioritários e mantendo o atraso dos quadros BE em valores bem mais satisfatórios para o usuário final.

Apesar da proposta deste trabalho se basear em resguardar condições mínimas para o tráfego BE das redes EPONs, evidentemente não se pode deixar de analisar o impacto sobre os tráfegos de maior prioridade, denominados aqui de P1 e P2. A Tabela 10 mostra o aumento do atraso nestas classes em cada cenário sob o maior percentual obtido de utilização da ONU.

Tabela 10 - Comparativo de aumento do atraso nas classes privilegiadas

Cenário (carga)	Atraso (em segundos) nas classes sob a carga usada no cenário				Aumento do atraso (segundos)	
	P1		P2		P1	P2
	IPACT	IPACT melhorado	IPACT	IPACT melhorado		
<b>1 (40%)</b>	0,001	0,002	0,002	0,006	0,001	0,004
<b>2 (40%)</b>	0,002	0,003	0,003	0,005	0,001	0,002
<b>3 (60%)</b>	0,008	0,010	0,007	0,008	0,002	0,001

Analisando-se os valores do aumento dos atrasos nas classes P1 e P2 conclui-se que, apesar de em termos percentuais eles serem significativos, em termos absolutos, em nenhum dos cenários, eles não elevam o atraso do tráfego P1 em mais de 1 milissegundo e mais que 4

milissegundos para a classe P, sempre mantendo essas classes dentro dos parâmetros de atraso máximos exigidos para as classe, conforme visto na Subseção 3.3.

# 6

## CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

*Este capítulo apresenta as conclusões gerais e propostas de trabalhos futuros que podem ser realizados a partir deste.*

### 6.1 Conclusões Gerais

Nesta dissertação apresentou-se um modelo híbrido analítico/simulado para análise de tráfego no sentido de subida de uma Rede Óptica Passiva Ethernet (EPON). O modelo feito em redes de Petri se mostrou válido quando comparado com os resultados analíticos e também com outras publicações recentes sobre EPON. Uma vantagem deste modelo é sua baixa complexidade computacional que permite simulações de alto número de iterações com baixo tempo computacional.

A ferramenta DaNAMICS permite multiplicar com facilidade a Unidade Ótica de Rede (ONU) modelada em Petri e com pequenas alterações criar novas unidades com Acordo de Nível de Serviços (SLAs) diferentes da original. Desta forma pode-se combiná-las e gerar um Terminal Ótico de Linha (OLT) atendendo ONUs heterogêneas o que se apresenta como uma alternativa interessante aos trabalhos que tomam em geral como premissa OLTs atendendo clientes em unidades com mesmas SLAs.

Como visto ao longo desta dissertação o tráfego de melhor esforço (BE) tem sido repetidamente negligenciado nos estudos sobre alocação de largura de banda em redes ópticas passivas, apesar de sua alta predominância nas redes atuais e nas previsões de tráfego futuras. Conclui-se então que, um mecanismo que garanta o bom funcionamento deste tráfego é necessário para garantir a continuidade dos serviços tradicionais, tais como HTTP, FTP, POP,

SMTP, IMAP entre outros, que ainda são notadamente a grande massa de dados que circulam nas redes IPs mundialmente.

A proposta de melhoria do IPACT mostra-se bastante vantajosa quando a carga de tráfego de melhor esforço (BE) da ONU é significativa (pelo menos 1/3 da carga total). Nesta situação tem-se uma melhoria sensível no desempenho deste tráfego sem que os tráfegos de maior prioridade sofram penalidades significativas. Quando a carga da ONU caracteriza-se por alto percentual de tráfego prioritário, a solução proposta pode acarretar uma penalidade nestes que prejudiquem as aplicações mais sensíveis ao atraso, como voz e vídeo. No cenário com apenas 20% de tráfego BE, quando a solução foi aplicada, o tráfego de maior prioridade sofreu um atraso de 10 milissegundos quando atingiu 55% de utilização da ONU. Este atraso chegou a superar o atraso do tráfego de prioridade intermediária. Vale aqui ressaltar que este cenário no qual temos baixa carga do tráfego BE é um cenário que pouco espelha a realidade atual das redes globais, bem como as previsões para o tráfego para os próximos anos [CISCO, 2010]

Analisando-se de maneira geral o objetivo do trabalho, que era reduzir a penalidade sobre o tráfego BE, foi atingido em todos os três cenários estudados, o que demonstra que a melhoria proposta é uma alternativa interessante e viável para aplicar no cenário na qual as redes ainda trafegam uma grande carga de dados classificados como de menor prioridade (tráfego de melhor esforço – BE)

## **6.2 Trabalhos Futuros**

Para aprimoramento deste trabalho sugere-se o estudo para obtenção de um algoritmo que calcule automaticamente, com base na carga do tráfego da ONU, a constante que foi usada para compensar os atrasos no tráfego BE (Equação 11). Uma sequência de testes com

diversos cenários nas ONUs (inclusive com diferentes SLAs) pode gerar dados para o desenvolvimento deste algoritmo.

Um mecanismo que compense a aumento do atraso das classes privilegiadas quando estas são a maioria na carga da ONU também poderá ser um estudo derivado, de forma a tornar mais ampla a aplicabilidade da melhoria proposta.

Devido à flexibilidade do modelo desenvolvido, já exposta na Subseção 6.1, outro interessante trabalho futuro é aproveitar este modelo para gerar ONUs que tenham SLAs diferentes e desta forma analisar melhor o impacto do atraso de quadros em redes com clientes heterogêneos.

Ampliar os testes aqui realizados para o emergente padrão 802.3av (10G-EPON), que é desenvolvido sob a premissa de total compatibilidade com o padrão 802.3ah, também contribuirá para analisar a proposta sob este novo patamar de velocidades das redes ópticas passivas Ethernet.

## 7

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al Zahr, S. e Gagnaire. “An Analytical Model of the IEEE 802.3ah MAC Protocol for EPON-based Access Systems”, Telecom, Paris, 2006.

“ANSI/IEEE Standart 802.1D, 1998 (ed.) - IEEE standard for information technology - Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks”. Disponível em: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.1D-1998.pdf>. Acesso em: fevereiro de 2009.

“CISCO visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2009–2014 (2010)”. Disponível em: <http://www.cisco.com>. Acesso em: março de 2011.

“DaNAMiCS – A Petri Net Editor”. Disponível em: <http://www.cs.uct.ac.za/Research/DNA/DaNAMiCS/DownLoads.html>. Acesso em: janeiro de 2009

“FTTH Handbook - 4th ed. – Revision Date 14/01/2011”. Disponível em: [http://www.ftthcouncil.eu/nl/member\\_area/member\\_area\\_home/ftth\\_handbook/?cid=291](http://www.ftthcouncil.eu/nl/member_area/member_area_home/ftth_handbook/?cid=291). Acesso em: março de 2011.

“IEEE 802.3ah Task Force home page”. Disponível em: <http://www.ieee802.org/3/emf>. Acesso em: dezembro de 2009

Jain, R.; "The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling", Wiley- Interscience, Nova York, 1991.

Kramer, G.; Mukherjee, B; e Psesavento, G. “3 IPACT: A Dynamic Protocol for an Ethernet PON (EPON)”, IEEE Communications Magazine, v. 40, n. 2, p. 74–80, fev. 2002.

Kramer, G., Banerjee, A., Singhal, N., Mukherjee, B., Dixit, S., and Ye, Y. (2004). Fair Queuing with Service Envelopes (FQSE): A cousin-fair hierarchical scheduler for subscriber access networks. IEEE J. Select. Areas Commun., v. 22, n.8, p. 1497–1513. É and ou e

Lannoo, Bart *et al.* “Thorough Analysis of the IPACT Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm for EPONs”, BROADNETS 2007. Fourth International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems, 2007.

Lee, Y., e Mukherjee, B. “Traffic Engineering in Next-Generation Optical Networks”, IEEE Communications Surveys & Tutorials. Disponível em: [www.comsoc.org/pubs/surveys](http://www.comsoc.org/pubs/surveys). Acesso em: maio 2009.

Magalhães, H. “Europa Oriental lidera corrida por fibra óptica”, em Valor On Line de 10/02/2011. Disponível em: [http://www.valoronline.com.br/impresso/empresas/102/382910/europa-oriental-lidera-corrída-por-fibra-optica?quicktabs\\_3=1](http://www.valoronline.com.br/impresso/empresas/102/382910/europa-oriental-lidera-corrída-por-fibra-optica?quicktabs_3=1) . Acesso em: março de 2011.

Menascé, D. e Almeida, V. “Planejamento de capacidade para serviços na Web: métricas, modelos e métodos”, Campus, Rio de Janeiro, 2003.

Mokarzel, Marcos Perez. “Redução do tempo de zapping em serviços IPTV sobre redes GPON utilizando vídeos escaláveis”, Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2010.

Nowak, D. “Dynamic Bandwidth Allocation Algorithms for Differentiated Services enabled Ethernet Passive Optical Networks with Centralized Admission Control”, Tese (PhD) - School of Electronic Engineering, Dublin City University, Irlanda, 2005.

Nunes, Mário Serafim dos Santos. “Redes de Acesso Multiserviço”. Notas de Aula Março de 2002 - Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores - Instituto Superior Técnico – Lisboa. Disponível em [http://comp.ist.utl.pt/ec-ra/textos-aulas/RAMS\\_PartA-V5.pdf](http://comp.ist.utl.pt/ec-ra/textos-aulas/RAMS_PartA-V5.pdf). Acesso em: fevereiro de 2011.

Paltridge, Sam “Industry in Crisis (?)” em Proceedings of CEPT Conference. outubro de 2003. Disponível em: <http://www.ero.dk/49A8343C-18E0-4B81-B77B-5DAD9CD4B822?frames=no&>. Acesso em: 14 de abril de 2006.

Pereira, F. de Melo “Modelagem, Policiamento e Escalonamento em Redes Ethernet PON”. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, Brasil, 2006.

Pereira, F. de Melo; Fonseca, Nelson L.S.; Arantes, Dalton S. “Uma política de escalonamento justa para redes Ethernet com elementos ópticos passivos”. In: 25º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC '07), Belém/PA, Brasil, 2007.

Pesavento, G. “Point to Multipoint Ethernet Passive Optical Network (EPON) Tutorial / Jan/01”. Ethernet in the First Mile IEEE 802.3 Study Group. Disponível em: [http://www.ieee802.org/3/efm/public/jul01/tutorial/pesavento\\_1\\_0701.pdf](http://www.ieee802.org/3/efm/public/jul01/tutorial/pesavento_1_0701.pdf). Acesso em: março de 2011.

Presidência da República Federativa do Brasil. Brasil Conectado - Programa Nacional de Banda Larga (PNBL). “Implantação e Desenvolvimento”. Disponível em: <http://www4.planalto.gov.br/brasilconectado/pnbl/implantacao-e-desenvolvimento>. Acesso em: março de 2011.

Sherif R. Sherif *et al.* “A Novel Decentralized Ethernet-Based PON Access Architecture Provisioning Differentiated QoS. at Journal of Lightwave Technology, vol. 22, no. 11, November 2004.

“Solid System - True WDM-PON, BlueCross 1600”. Disponível em: [http://www.solidsystems.co.kr/products\\_bluecross1600.htm](http://www.solidsystems.co.kr/products_bluecross1600.htm). Acesso em: março de 2011.

Tatsuta, Tsutomu *et al.* “Standardization of GPON (Gigabit Passive Optical Network) in ITU-T”. Outubro de 2003. Disponível em: <http://www.ntt.co.jp/tr/0310/files/ntr200410089.pdf>. Acesso em: abril de 2006.

Teixeira, Edson Rodrigues Duffles. “Tutoriais Banda Larga e VoIP”. 2004. ESATH Consultoria. Disponível em: [http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwimax/pagina\\_1.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwimax/pagina_1.asp). Acesso em: março de 2006.

Villalba, Tany V. “Distribuição de Divisores de Potência em Redes Ópticas Passivas Utilizando Algoritmos Genéticos”. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlo da Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2009.

Zi-yi, Fu e Suo-zhu, Lv, "A EPON Dynamic Bandwidth Assignment Algorithm Share-based the Multiple Traffic Prediction". In: Third International Symposium on Electronic Commerce and Security Workshops (ISECS '10). China, 2010.

## Anexo I - Modelagem da ONU em redes de Petri usando a ferramenta DaNAMICS

A ferramenta DaNAMICS apresenta uma área de trabalho para a criação da rede de Petri na qual é possível a configuração dos lugares (*places*), transições temporais ou imediatas, arcos e os *tokens* coloridos (Figura 25).

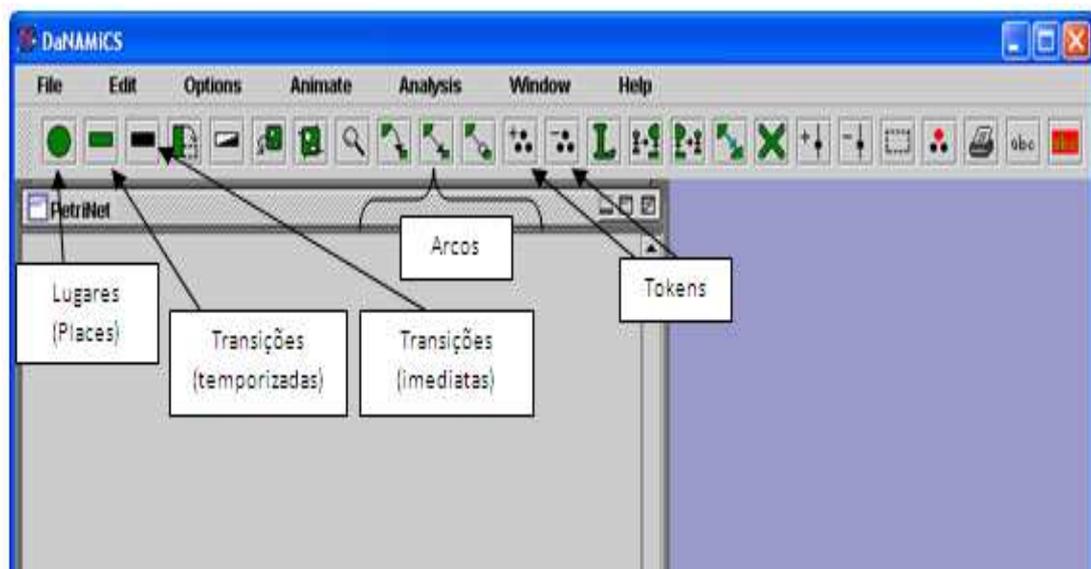


Figura 25 – Ambiente de Trabalho do DaNAMICS

O modelo final proposto para representar a ONU neste trabalho foi modelado conforme a Figura 26 na qual se tem as três filas de tráfego (P1, P2 e BE) e fila de segundo estágio que é a saída da ONU para a OLT. Na figura tem-se as três filas destacadas conforme as cores dadas para os *tokens* na Rede de Petri Colorida (Vermelho – P1, Verde – P2 e Azul – BE). Vale notar que na visão da OLT estas filas serão unidas em uma única fila que será servida pelo *timeslot* oferecido por esta, baseado no seu algoritmo de escalonamento.

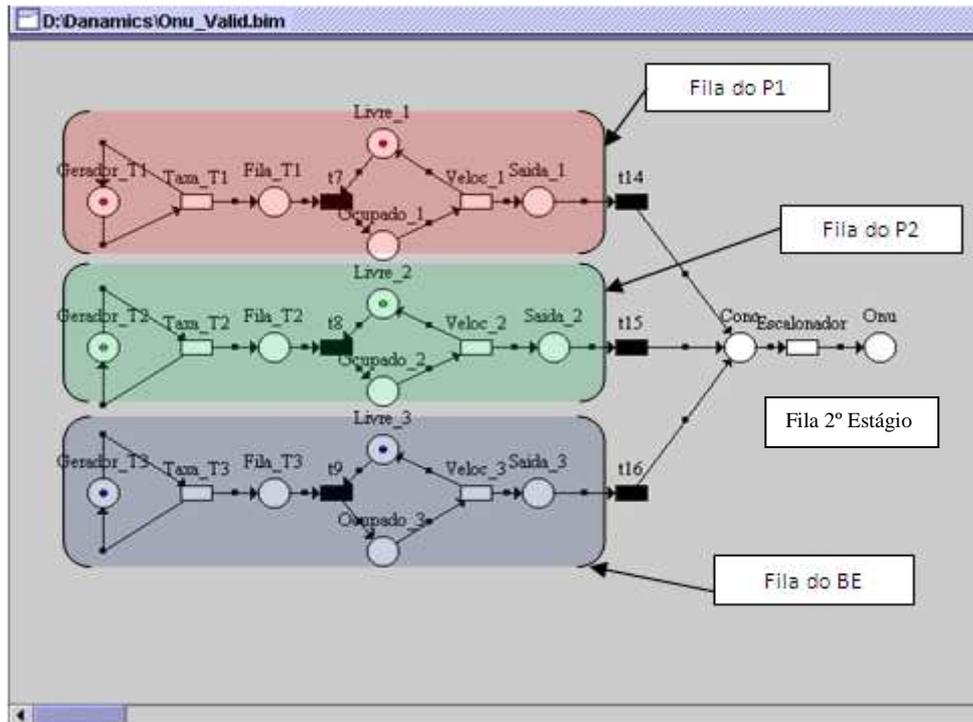


Figura 26 - Filas modeladas em Rede de Petri Colorida.

A primeira parte modelada foi a dos geradores de tráfegos Gerador\_T1, Gerador\_T2 e Gerador\_T3. Eles são responsáveis por gerar tráfego das três classes de maneira proporcional aos cenários propostos (Cenário 1, Cenário 2 e Cenário 3).

A proporção do tráfego gerado é dada nas transições Taxa\_1, Taxa\_2 e Taxa\_3, que somadas devem representar a totalidade da carga da ONU naquele momento. Por exemplo, numa carga total da ONU de 5000 quadros por segundo e uma proporção de 50% de tráfego BE, 30% de tráfego P2 e 20% de tráfego P1 (cenário 1) tem-se que os temporizadores Taxa\_T1, Taxa\_T2 e Taxa\_T3 devem ser respectivamente 1000 (20% de 5000), 1500 (30% de 5000) e 2500 (50% de 5000). Na figura 27 tem-se a Taxa\_T1 (chamada na ferramenta de *firing weight*) sendo configurada para esta situação.

A numeração “100” vista na mesma Figura 27 indica que esta transição colorida gera apenas tokens vermelhos, ou seja, um token vermelho, zero tokens verdes e zero tokens azuis (1-0-0).

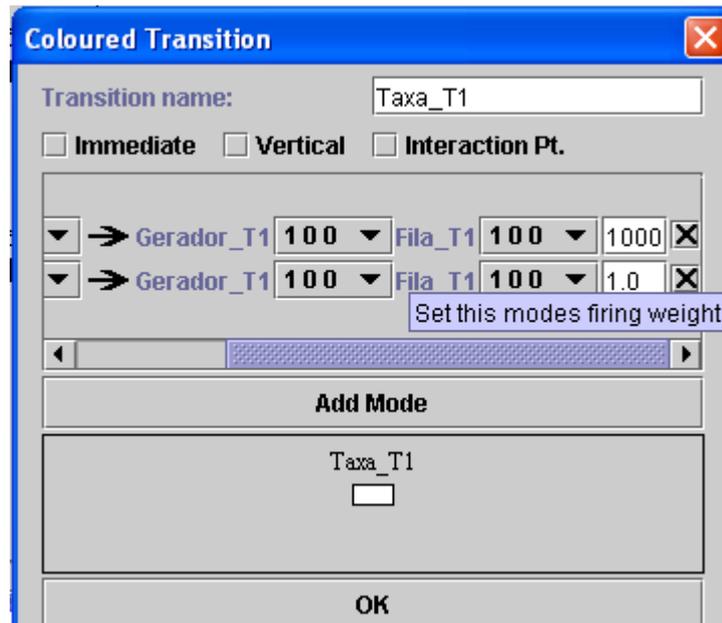


Figura 27 - Configurando a Taxa\_T1

Nas transições Veloc\_1, Veloc\_2 e Veloc\_3 é que se define a prioridade do tráfego. Como P1 é três vezes mais prioritário que BE e P2 duas vezes mais estes serão configurados proporcionalmente a estes valores, sendo que a soma destas velocidades evidentemente tem que ter a capacidade total de transmissão da ONU (largura de banda dada para cada ONU, convertida para quadros por segundo). Foi considerado aqui que o canal da ONU tem uma capacidade total de 100Mbps (ver Tabela 7) e que os quadros possuem um tamanho médio de 1500 bytes.

Na transição Escalonador levou-se em consideração que a capacidade do canal que vai até a OLT é de 1000Mbps (1Gbps) (ver Tabela 7) também convertida para quadros por segundo. Na saída da ONU (Lugar “Onu”) a fila tem tamanho limitado (fila M/M/1/K); este limite é colocado no campo “*limited*” do lugar “Onu” (*place*) conforme mostra a Figura 28.

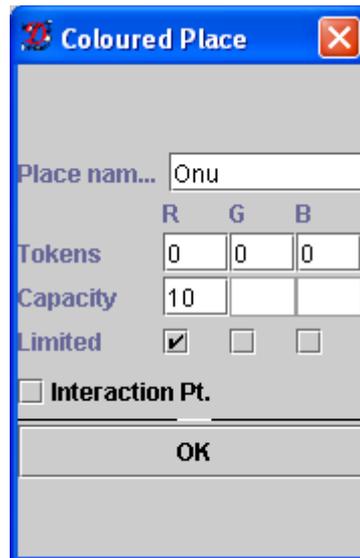


Figura 28 - Limitando o número Máximo de quadros da fila da ONU

Depois de modelado o sistema executa-se a simulação que no caso desta dissertação consiste em 1 milhão de iterações. A Figura 29 mostra este procedimento.

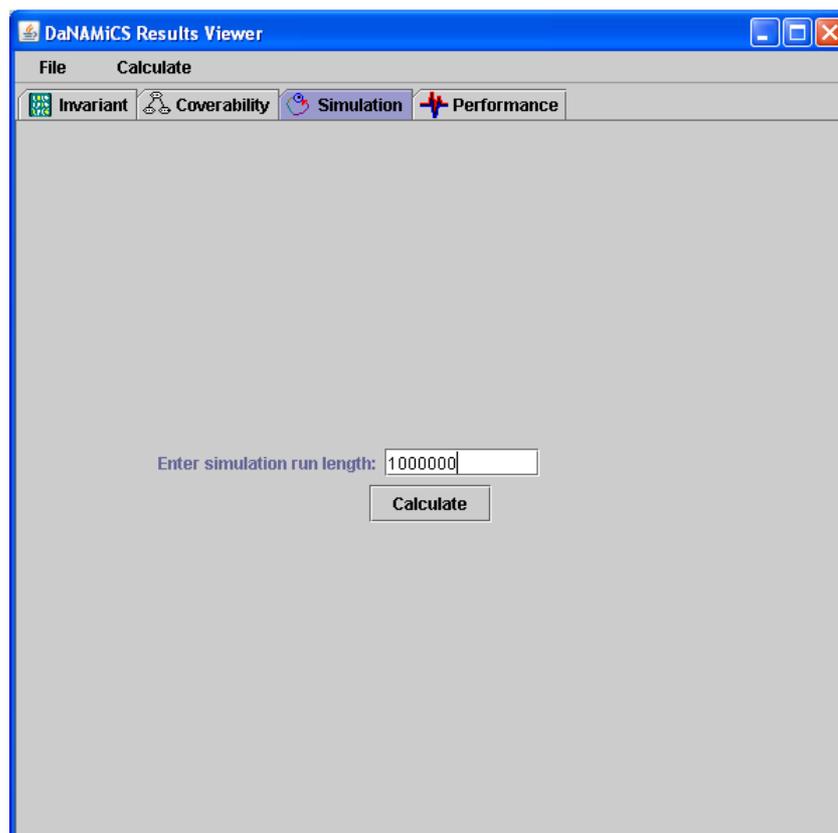


Figura 29 - Realizando as iterações

Chegou-se a este valor após sucessivos incrementos até verificar que os valores do tamanho da fila estabilizavam (ver figura 30).

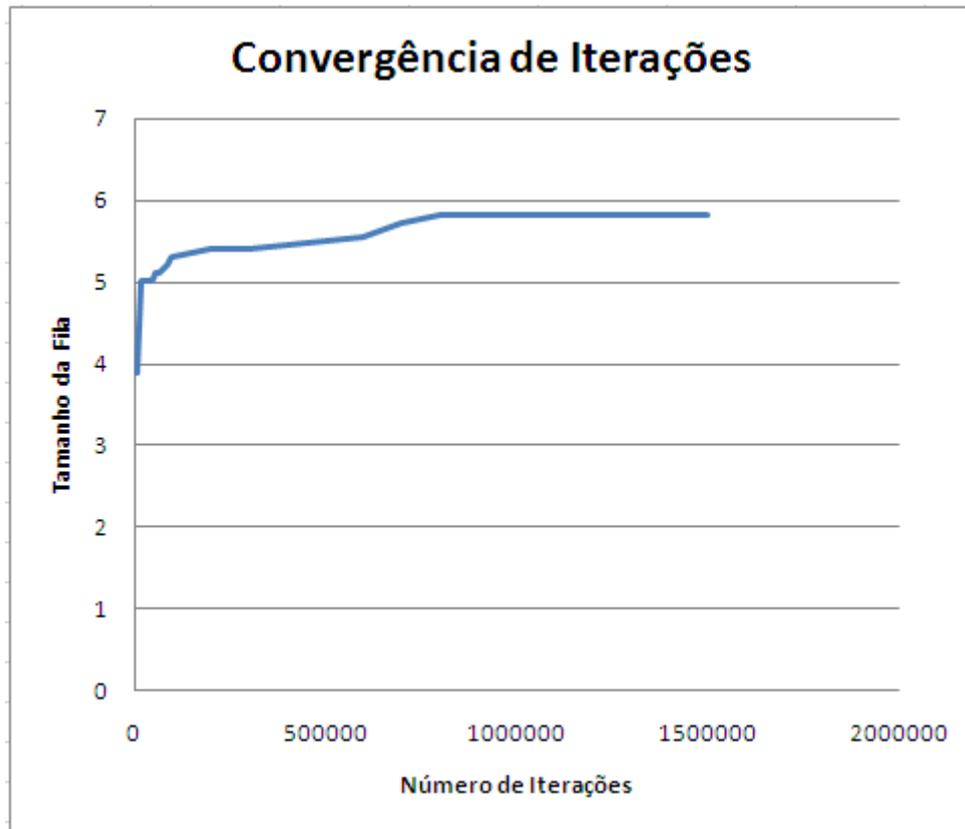


Figura 30 – Atingindo a Estabilidade na Simulação

O resultado da simulação fornece entre outros valores o tamanho da fila de cada lugar (*place*) (Figura 31).

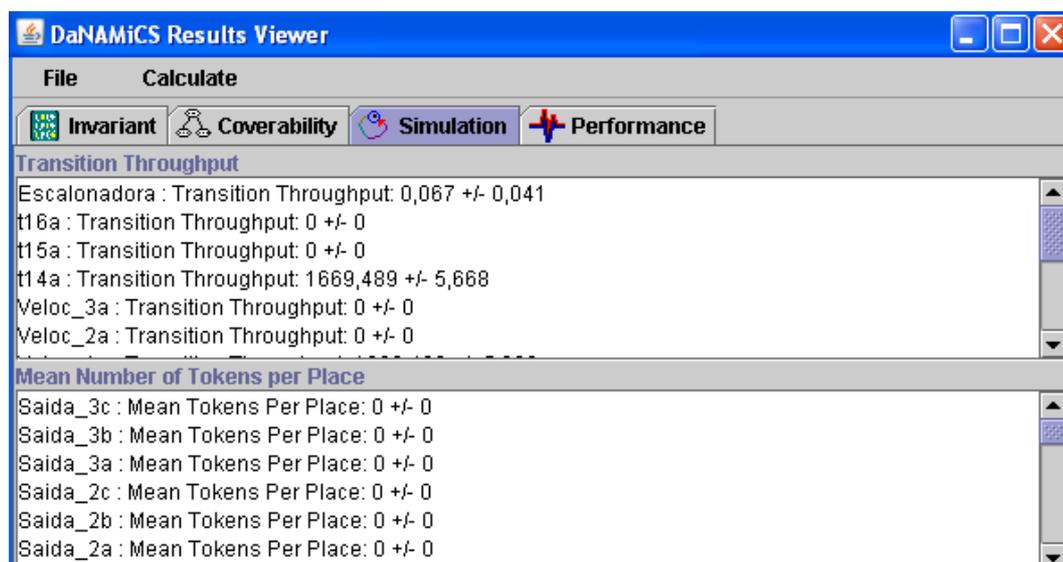


Figura 31 - Resultado da simulação

Para cada situação da ONU repetiu-se o experimento dez vezes. Os resultados obtidos foram usados para obter as médias dos tamanhos das filas. Estes resultados foram lançados em um gráfico de modo a calcular o intervalo de confiança (Figura 32).

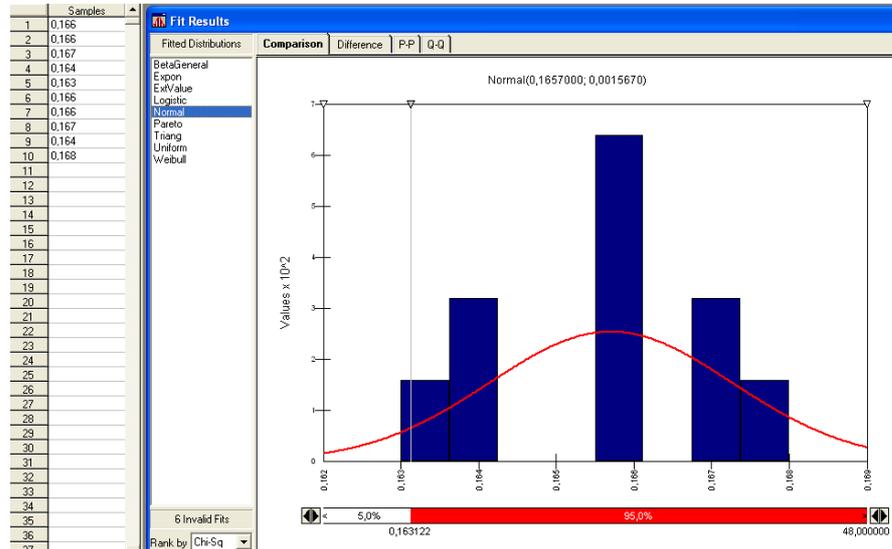


Figura 32 – Achando o intervalo de confiança

Os resultados obtidos estavam num intervalo de confiança de 95% (noventa e cinco por cento). Foram estes valores médios se utilizou para o cálculo do atraso em cada fila e assim obter o atraso médio total dos quadros em todo o sistema da ONU.