

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

**PROPOSTA DE UM ALGORITMO HÍBRIDO DE AGENDAMENTO DE  
GRANTS BASEADO NA PRIORIZAÇÃO DE FILAS PARA  
GERENCIAMENTO DE RECURSOS EM WDM-PONs**

JOÃO GABRIEL EVANGELISTA ALEIXO

DM 15/2011

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

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

JOÃO GABRIEL EVANGELISTA ALEIXO

**PROPOSTA DE UM ALGORITMO HÍBRIDO DE AGENDAMENTO DE  
GRANTS BASEADO NA PRIORIZAÇÃO DE FILAS PARA  
GERENCIAMENTO DE RECURSOS EM WDM-PONs**

DM 15/2011

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

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

JOÃO GABRIEL EVANGELISTA ALEIXO

**PROPOSTA DE UM ALGORITMO HÍBRIDO DE AGENDAMENTO DE  
GRANTS BASEADO NA PRIORIZAÇÃO DE FILAS PARA  
GERENCIAMENTO DE RECURSOS EM WDM-PONs**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

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

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Biblioteca Central da UFPA, Belém

Aleixo, João Gabriel Evangelista

Proposta de um algoritmo híbrido de agendamento de Grants baseado na priorização de filas para gerenciamento de recursos em WDM-PONs / João Gabriel Evangelista Aleixo, orientador, Eduardo Coelho Cerqueira. – 2011.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará – Instituto Tecnológico – ITEC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE. Belém, 2011.

1. Comunicações óticas. 2. Comutação por pacotes (Transmissão de dados). 3. Telecomunicações. 4. Multiplexação. 5. Rede de computadores. 6. Algoritmos. I. Cerqueira, Eduardo Coelho, orientador. II. Título.

CDD - 21. ed. 621.3827

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

**PROPOSTA DE UM ALGORITMO HÍBRIDO DE AGENDAMENTO DE  
GRANTS BASEADO NA PRIORIZAÇÃO DE FILAS PARA  
GERENCIAMENTO DE RECURSOS EM WDM-PONs**

AUTOR: JOÃO GABRIEL EVANGELISTA ALEIXO

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 A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM 06-04-2011.

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. EDUARDO COELHO CERQUEIRA  
(Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFPA – Orientador)

---

Prof. Dr. JOÃO CRISÓSTOMO WEYL ALBUQUERQUE COSTA  
(Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – UFPA)

---

Prof. Dr. ANTÔNIO JORGE GOMES ABELÉM  
(Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação – UFPA)

VISTO:

---

Prof. Dr. MARCUS VININIUS ALVES  
(Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – UFPA)

UFPA/ITEC/PPGEE

À Deus, minha família, amigos, colegas de trabalho e orientadores pelo apoio, força, incentivo, companheirismo e amizade. Sem vocês nada disso seria possível.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por iluminar meu caminho e me dar forças para seguir sempre em frente.

Ao meu orientador e co-orientador, Antonio Jorge Gomes Abelém e Eduardo Coelho Cerqueira, pelo apoio irrestrito, confiança e principalmente paciência e compreensão.

A todos os amigos do Grupo de Estudos em Redes de Computadores e Comunicação Multimídia (GERCOM), em especial ao Vagner Nascimento, pelas intermináveis discussões e pelas contribuições para a conclusão desta dissertação.

Aos meus pais, João Aleixo (in memorian) e Pedrita Aleixo, por todo o amor, carinho e apoio incondicionais. Sempre me espelhei em vocês para motivar meu crescimento pessoal e profissional. Vocês sempre foram a minha base de sustentação. Obrigado por tudo. Amo vocês.

Aos meus familiares e amigos que, de perto ou de longe, sempre me apoiaram e me motivaram. Vocês também fazem parte desta conquista. Obrigado a todos.

“Descobri como é bom chegar quando se tem paciência. E para se chegar aonde quer que seja, aprendi que não é preciso dominar a força, mas a razão. É preciso antes de mais nada, querer.”

Amyr Klink

“Eu procuro lembrar a mim mesmo, umas cem vezes por dia, que minha vida privada e profissional depende do trabalho de outras pessoas, vivas e mortas, e que preciso me superar para dar aos outros algo próximo do que eu recebi e recebo”

Albert Einstein



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	A EVOLUÇÃO DAS REDES ÓPTICAS NAS REDES DE ACESSO .....	1
1.2	OBJETIVOS .....	4
1.3	DESCRIÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	4
1.4	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	5
<b>2</b>	<b>REDES ÓPTICAS PASSIVAS E SUA PRÓXIMA GERAÇÃO .....</b>	<b>7</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	7
2.2	ARQUITETURA GERAL .....	8
2.3	TOPOLOGIAS .....	10
2.4	TDM-PONs .....	11
2.4.1	APON e BPON .....	12
2.4.2	EPON .....	13
2.4.3	GPON .....	13
2.4.4	Comparação entre os Padrões .....	13
2.5	NG-PONs .....	15
2.5.1	Padrões IEEE 802.3av e ITU-T G.987 .....	15
2.5.2	WDM-PONs .....	17
2.5.2.1	Principais Desafios de Pesquisa .....	20
2.5.2.2	Projetos e Arquiteturas .....	22
<b>3</b>	<b>GERENCIAMENTO DE RECURSOS EM WDM-PONS .....</b>	<b>24</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	24
3.2	NEGOCIAÇÃO DE RECURSOS .....	25
3.2.1	Descoberta e Registro .....	26
3.2.2	Coordenação Upstream e Downstream .....	27
3.3	AGENDAMENTO DE GRANTS .....	28
3.3.1	Frameworks de Agendamento .....	32
3.3.1.1	Offline .....	33
3.3.1.2	Online .....	34
3.3.2	Políticas de Agendamento .....	36
3.4	ALOCAÇÃO DA LARGURA DE BANDA .....	37
<b>4</b>	<b>PROPOSTA DO ALGORITMO HGS-PQ .....</b>	<b>41</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	41
4.2	TRABALHOS RELACIONADOS .....	42
4.3	ARQUITETURA ADOTADA .....	43
4.3.1	Topologia .....	44
4.3.2	Características Físicas dos Componentes .....	45
4.3.3	Estratégia para Migração das Redes TDM-PONs .....	46
4.3.4	Protocolo MAC e Algoritmos DBA .....	48
4.3.4.1	Batching Earliest Departure First - BEDF .....	50
4.3.4.2	Sequential Scheduling with Schedule-Time Framing - $S^3F$ .....	52
4.4	HGS-PQ PARA ARQUITETURA SUCCESS-HPON .....	54
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DA PROPOSTA .....</b>	<b>61</b>
5.1	INTRODUÇÃO .....	61
5.2	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS ALGORITMOS .....	62
5.3	SIMULAÇÕES EM AMBIENTE COMPUTACIONAL .....	64
5.3.1	CENÁRIOS .....	65
5.3.2	METODOLOGIA .....	66

5.3.3	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS.....	68
5.3.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	69
5.3.4.1	Cenário 1: SUCCESS-HPON com área de abrangência de 20 km.....	69
5.3.4.2	Cenário 2: Long-Reach SUCCESS-HPON: 100 km de área de abrangência.....	77
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>82</b>
6.1	CONCLUSÕES GERAIS.....	82
6.2	TRABALHOS FUTUROS.....	83
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>85</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>89</b>
	<b>ANEXO A – ARQUIVO OMNETPP.INI COM OS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO.....</b>	<b>90</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Quantidade de assinantes FTTH e FTTB em países asiáticos. ....	2
Figura 2 – Arquitetura Básica das Redes Ópticas Passivas [Kramer, 2005].....	8
Figura 3 – Abordagens FTTx [Arbieto, 2007] .....	9
Figura 4 – Topologias PONs [Kramer, 2005] .....	10
Figura 5 – Alocação do Tráfego Downstream [Silva, 2010].....	11
Figura 6 – Alocação do Tráfego Upstream [Silva, 2010].....	12
Figura 7 – Grupos FSAN NG-PON.....	16
Figura 8 – Arquitetura WDM-PON [Ritter, 2010].....	17
Figura 9 – Simplificação das redes de telecomunicações [Mukherjee, 2006].....	19
Figura 10 – Arquitetura básica das WDM-PONs de longa distância. ....	19
Figura 11 – Mensagens de negociação de recursos [Luo, 2007].....	25
Figura 12 – Extensões WDM propostas para os PDUs MPCP. [McGarry, 2006].....	28
Figura 13 – Ilustração do ciclo de agendamento [McGarry, 2008].....	30
Figura 14 – Abordagem em camadas para o agendamento de <i>grants</i> [McGarry, 2008].....	32
Figura 15 – Extremos entre os <i>frameworks</i> de agendamento.....	33
Figura 16 – Agendamento <i>Offline</i> .....	34
Figura 17 – Agendamento <i>Online</i> utilizando a política NASC [McGarry, 2008].....	35
Figura 18 – Algoritmo WDM IPACT [Kwong et al, 2004]. ....	40
Figura 19 – Arquitetura SUCCESS-HPON [An et al., 2004] .....	44
Figura 20 – Blocos Lógicos do OLT (a) e da ONU (b) WDM [An et al., 2004] .....	46
Figura 21 – Cenário de migração para SUCCESS-HPON [An et al., 2004].....	47
Figura 22 – Formato dos <i>frames</i> do protocolo MAC [Kim, 2005]. ....	48
Figura 23 – Exemplo de agendamento no BEDF [Kim, 2005]. ....	52
Figura 24 – Pseudocódigo do Algoritmo S <sup>3</sup> F [Kim, 2005]. ....	53
Figura 25 – Processo de definição do marco AG_GLOBAL.....	56
Figura 26 – Utilização da Política LQF e mecanismo de justiça entre os tráfegos .....	58
Figura 27 – Operação do algoritmo HGS-PQ .....	59
Figura 28 – Cenário 1: Arquitetura SUCCESS-HPON com 20 km de alcance. ....	65
Figura 29 – Cenário 2: Arquitetura SUCCESS-HPON com 100 km de alcance. ....	66

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição das cargas totais entre os tráfegos.....	67
Gráfico 2 – Atraso Médio Downstream x Carga Total para 4TX/4RX.....	70
Gráfico 3 – Atraso Médio Upstream x Carga 4TX/4RX.....	71
Gráfico 4 – Atraso Médio Total x Carga Total para 4TX/4RX.....	72
Gráfico 5 – Vazão Total x Carga Total para 4TX/4RX. ....	73
Gráfico 6 – Atraso Médio Downstream x Carga Total para 6TX/6RX.....	74
Gráfico 7 – Atraso Médio Upstream x Carga Total para 6TX/6RX .....	75
Gráfico 8 – Atraso Médio Total x Carga Total para 6TX/6RX.....	76
Gráfico 9 – Vazão Total x Carga Total para 6TX/6RX .....	77
Gráfico 10 – Atraso Médio Upstream x Carga Total para 6TX/6RX - LR .....	78
Gráfico 11 – Atraso Médio Upstream x Carga Total para 6TX/6RX - LR .....	79
Gráfico 12 – Atraso Total x Carga Total para 6TX/6RX - LR.....	80
Gráfico 13 – Vazão Total x Carga Total para 6TX/6RX – LR .....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Padrões TDM-PON e suas especificações [Abrams, 2005]. .....	14
Tabela 2 – Principais Arquiteturas WDM-PONs. ....	23
Tabela 3 – Algoritmos propostos para a arquitetura SUCCESS-HPON.....	60
Tabela 4 – Síntese da análise comparativa .....	64
Tabela 5 – Configurações de Transmissores e Receptores no OLT.....	67
Tabela 6 – Parâmetros e seus valores .....	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADM	Add-Drop Multiplexer
ASE	Amplified Spontaneous Emission
ATM	Asynchronous Transfer Mode
APON	ATM PON
BPON	BroadBand PON
CDR	Clock and Data Recovery
CO	Central Office
CW	Continuous Wave
DBA	Dynamic Bandwidth Allocation
DFB	Distributed Feedback Laser
DSL	Digital Subscriber Line
EFM	Ethernet in the First Mile
FSAN	Full Service Access Network
FTTB	Fiber-to-the-Building
FTTC	Fiber-to-the-Curb
FTTCab	Fiber-to-the-Cabinet
FTTH	Fiber-to-the-Home
GPON	Gigabit PON
HGS-PQ	Hybrid Grant Scheduler based on Priority Queuing
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Networks
LE	Local Exchange
MPCP	Multipoint Control Protocol
NASC	Next Available Supported Channel
NG	Next Generation
OAM	Operation Administration and Maintenance
ODN	Optical Distribution Network
OLT	Optical Line Terminal
ONU	Optical Network Unit
ONT	Optical Network Terminal
OTDR	Optical Time-Domain Reflectometer
PON	Passive Optical Network
QoS	Quality of Service
RN	Remote Node
RTT	Round-trip-time
SLA	Service Level Agreement
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SOA	Semiconductor Optical Amplifier

TDM	Time Division Multiplexing
TPS	Triple Play Service
VOQs	Virtual Output Queues
WAN	Wide Area Network
WDM	Wavelength-Division Multiplexing
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WiMax	Worldwide Interoperability for Microwave Access

## RESUMO

As Redes Ópticas Passivas (*Passive Optical Networks* - PONs) vêm experimentando um sólido crescimento nas últimas décadas por terem sido concebidas como uma excelente alternativa para a solução de um dos maiores problemas para as redes de telecomunicações: o gargalo nas redes de acesso. A próxima geração desta tecnologia, as chamadas *Next Generation* PONs (NG-PON), surgem como consequência da evolução das tecnologias ópticas e oferecem suporte aos serviços de próxima geração, melhorando os parâmetros de desempenho das TDM-PONs e inclusive aumentando a área de cobertura destas redes. Esta expansão geográfica beneficia as empresas de telecomunicações que passam a focar seus esforços na simplificação de suas infra-estruturas através da unificação das redes metropolitanas, de acesso e de *backhaul*, reduzindo a quantidade de nós e, conseqüentemente, de custos operacionais e financeiros. Trata-se de uma significativa mudança no cenário das redes de acesso que passam a ter grandes distâncias entre as *Optical Network Units* (ONUs) e o *Central Office* (CO) e uma imensa variedade de serviços, tornando fundamental a presença de algoritmos de agendamento capazes de gerenciar todos os recursos compartilhados de forma eficiente, ao mesmo tempo que garantem controle e justeza na alocação dinâmica dos tráfegos upstream e downstream. É a partir deste contexto que esta dissertação tem como objetivo geral apresentar a proposta de um algoritmo híbrido de agendamento de *grants* baseado na priorização de filas (*Hybrid Grant Scheduler based on Priority Queuing* – HGS-PQ), que além de gerenciar todos os recursos em WDM-PONs, busca oferecer eficiência e controle ao *Optical Line Terminal* (OLT) no agendamento dinâmico dos tráfegos. Os resultados apresentados foram extraídos de cenários desenvolvidos em ambiente de simulação computacional e se baseiam nas métricas de atraso e vazão para avaliação de seu desempenho. Também será avaliado como a quantidade de recursos no OLT interfere nestas métricas.

**PALAVRAS-CHAVE:** HGS-PQ, Redes Ópticas Passivas WDM, Redes de Próxima Geração, DBA, Algoritmos de Agendamento.



## ABSTRACT

Passive Optical Networks (PONs) have been experiencing solid growth in the last few decades because were designed as an excellent alternative to solve the major problem for telecommunications networks: the bottleneck in access networks. The next generation of this technology, called Next-Generation PON (NG-PON), is the consequence of developments in optical technologies and provides support to the next generation services, improving TDM-PONs performance parameters and expanding the coverage area of these networks. This geographical expansion benefits telecom companies that focus their efforts to simplify the network infrastructure by the unification of metropolitan, access and backhaul networks, decreasing the amount of local exchanges and even the number of nodes and, as a consequence, operational and financial costs. It means significant changes in the access networks scenario that tend to have large distances between ONUs and OLT, and a wide variety of services, making essential the presence of scheduling algorithms that are able to manage all shared resources efficiently, while ensuring fairness and the control in the upstream and downstream traffics dynamic allocation. It is through this context that this dissertation aims to present a hybrid grant scheduling algorithm based on priority queues, which gives efficiency and control to the OLT in the dynamic traffics scheduling. The results presented were obtained by the scenarios developed in a computational simulation environment and were based on the delay and throughput metrics for evaluating the algorithm performance. It will be also evaluated how the amount of resources in the OLT interferes in these metrics.

**KEYWORDS:** HGS-PQ, WDM Passive Optical Networks, Next-Generation Networks, DBA, Scheduling Algorithms.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 A EVOLUÇÃO DAS REDES ÓPTICAS NAS REDES DE ACESSO

As redes de acesso, também conhecidas como redes de primeira milha, conectam os assinantes residenciais e corporativos ao *Central Office* (CO) das empresas de telecomunicações. A demanda por largura de banda nestas redes tem crescido em larga escala com o passar dos anos principalmente pela ascensão de um dos modelos de negócio mais promissores para os provedores de serviço, o modelo *triple-play service* (TPS). Este modelo aplica o conceito de redes convergentes ao integrar os serviços de voz, dados e vídeo em uma mesma infra-estrutura de comunicação e necessita que esta seja capaz de garantir altas taxas de transferência e qualidade no oferecimento destes serviços aos assinantes.

Apesar dos esforços em aumentar a capacidade limite de transmissão de tecnologias cabeadas, como *Digital Subscriber Line* (DSL) e *Cable Modem*, e da evolução de tecnologias de redes sem fio, como WiFi (IEEE 802.11) e *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMax), a fibra óptica deverá conquistar cada vez mais espaço nos próximos anos pela sua ilimitada capacidade de transmissão e suporte aos serviços de próxima geração [Evans, 2008]. A largura de banda e o alcance das tecnologias sem fio e de cobre acabam sendo limitados em função das restrições impostas pelos seus meios físicos, cenário que impõe condições relevantes na escolha de uma tecnologia que além de considerar estes fatores também envolva questões como escalabilidade e custo.

Em 1995 foi criado o comitê *Full Service Access Network* (FSAN), que reuniu grandes operadoras e seus fornecedores de equipamentos com a finalidade de iniciar debates a respeito do desenvolvimento de uma solução de acesso completa para os serviços de voz, dados e vídeo. Na época, duas opções lógicas surgiram para protocolo e planta física: *Asynchronous Transfer Mode* (ATM) e *Passive Optical Network* (PON). ATM por prover garantias de qualidade de serviço e PON por ser a opção mais viável, da perspectiva financeira, para soluções *broadband* óptica em larga escala. Surgia então o padrão APON (ATM PON - ITU-T G.983), que logo depois teve seu nome substituído para *Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks* (BPON) com a finalidade de enfatizar que a tecnologia não era limitada somente ao tráfego ATM.

Em seguida, dois novos padrões ganharam notoriedade: *Ethernet* PON (EPON - IEEE 802.3ah) e *Gigabit* PON (GPON- ITU-T G.984) . Também denominadas *Time Division Multiplexed* PONs (TDM-PONs) por basearem-se na multiplexação por divisão do tempo, estes padrões tornaram-se populares e foram implantados por diversos provedores ao redor do mundo, contribuindo com a melhoria da experiência dos assinantes na entrega dos serviços *triple-play* e tornando-se tecnologia chave para as redes de próxima geração.

Todas as evidências indicam que o crescimento acelerado da utilização da Internet e a contínua demanda por largura de banda por parte dos assinantes continuarão crescendo pelos próximos anos. A Figura 1 apresenta a evolução do crescimento de usuários que utilizam soluções *fiber-to-the-home/building* (FTTH/B) em países asiáticos com o passar dos anos.

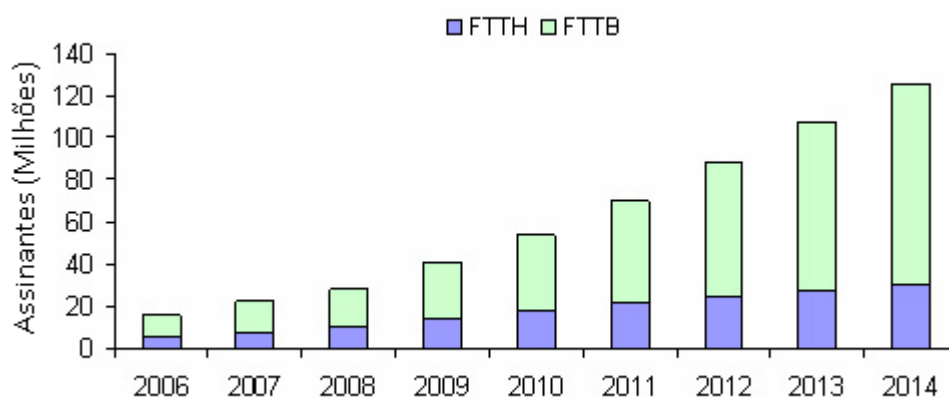


Figura 1 – Quantidade de assinantes FTTH e FTTB em países asiáticos [Frost&Sullivan, 2009].

Serviços como o compartilhamento de arquivos e o *peer-to-peer* (P2P), predominantes no consumo de largura de banda até então, serão ultrapassados pelos serviços de vídeo e outros tipos de conteúdo até 2014. Conexões de banda larga para acesso à Internet, que a alguns anos pareciam novidade para muitos assinantes, hoje já são consideradas normais em países em desenvolvimento. Um exemplo disso é a média global atual do *download* em ambientes residenciais que aumentou significativamente de 127 Kbps em 2000 para 4.4 Mbps. [Kerner, 2010].

Considerando este cenário de contínua evolução, a indústria de telecomunicações vem trabalhando na implantação e no desenvolvimento de padrões que vão além das

tradicionais TDM-PONs a fim de garantir que em um futuro próximo este crescimento seja suportado.

A tecnologia *Wavelength-Division Multiplexing* (WDM) vem sendo considerada como a solução ideal para o aumento da capacidade de transmissão nas redes de acesso. Diversas já foram as arquiteturas propostas para *WDM Passive Optical Networks* (WDM-PONs) que, além de focar seus interesses no aumento da quantidade de largura de banda disponibilizada aos assinantes, apresentam peculiaridades e objetivos distintos, dentre eles, prover maior escalabilidade, reduzir o custo final de equipamentos, melhorar o desempenho e gerenciamento dos recursos da rede, entre outros.

Outra grande vantagem bastante explorada nas WDM-PONs é a sua capacidade de propiciar a expansão dos limites geográficos das redes de acesso. Alguns projetos buscam estender a área de abrangência de 20 Km, distância máxima em PONs tradicionais, para 100 Km. Ao prover esta grande cobertura geográfica, as WDM-PONs de longa distância (*Long Reach WDM-PONs*) possibilitam a unificação das redes de acesso, metropolitanas e de *backhaul*, proporcionando economia às empresas de telecomunicações por simplificar a rede através da redução do número de interfaces de equipamentos, elementos de rede e até mesmo quantidade de nós.

Em função deste cenário, o aumento da distância entre os usuários finais e o CO traz como consequência o aumento dos atrasos de propagação entre ambos. Para aplicações em tempo real, por exemplo, exige-se que o atraso mínimo em uma rede de acesso permaneça em torno de 1 a 2 ms [Song et al., 2010]. Desta maneira, algoritmos de alocação dinâmica de banda (*Dynamic Bandwidth Allocation - DBA*) precisam ser desenvolvidos a fim de gerenciar os recursos da rede de forma inteligente, minimizando o impacto das grandes distâncias e proporcionando um bom desempenho na alocação dos tráfegos *upstream* e *downstream*.

Diante do exposto acima, ficam evidentes as novas perspectivas de pesquisa na área de desenvolvimento de algoritmos DBA motivados pela necessidade de gerenciamento inteligente e eficiente de recursos em WDM-PONs.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta dissertação é o desenvolvimento de um Algoritmo Híbrido para o Agendamento de *Grants* baseado na Priorização de Filas (*Hybrid Grant Scheduler based on Priority Queuing* - HGS-PQ), que além de gerenciar todos os recursos em WDM-PONs, apresenta comportamento híbrido ao buscar oferecer ao OLT eficiência no agendamento e controle nos processos de tomada de decisão através de políticas de agendamento. Para atingir o objetivo geral, alguns objetivos específicos deverão ser alcançados. São eles:

- Análise dos principais desafios de pesquisa em WDM-PONs;
- Estudo sobre as diversas arquiteturas e algoritmos de agendamento propostos na literatura;
- Análise das diversas políticas e teorias de agendamento;
- Desenvolvimento do algoritmo proposto em ambiente de simulação computacional para avaliação de seu desempenho;
- Análise comparativa do algoritmo proposto com demais algoritmos abordados na literatura;
- Publicação de artigo acadêmico envolvendo a proposta.

## 1.3 DESCRIÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O desenvolvimento desta dissertação envolveu estudos e investigações sobre a evolução das redes ópticas passivas, principais desafios de pesquisa, diferentes arquiteturas WDM-PONs propostas na literatura e seus respectivos algoritmos de agendamento.

Quanto à sua evolução, foi realizado um levantamento dos principais fatores motivacionais, dentre eles os problemas e limitações, que afetam as TDM-PONs e que incentivam a pesquisa, desenvolvimento, investimento, bem como a migração destas

tecnologias para a sua próxima geração. Também foram levantadas as principais soluções e alternativas propostas para NG-PONs bem como seus principais desafios.

Por se tratar de uma tecnologia ainda em processo de padronização, diversas são as arquiteturas WDM-PONs propostas na literatura. Este fator levou a uma investigação dos principais projetos e *testbeds* ao redor do mundo, analisando suas peculiaridades, pontos fortes e fracos, objetivos e similaridades. Tal levantamento, além de buscar o embasamento teórico necessário ao desenvolvimento do trabalho, fundamentou a escolha da arquitetura a ser utilizada como cenário para avaliação do algoritmo proposto.

Para avaliação da proposta, foi realizada uma análise comparativa entre o algoritmo HGS-PQ e os principais algoritmos propostos na literatura para gerenciamento dos recursos da arquitetura escolhida [Kim et al, 2005]. Esta análise foi realizada através de um modelo de simulação computacional para WDM-PONs desenvolvido no *Objective Modular Network Testbed in C++* (OMNET++), gentilmente cedido pela equipe do Laboratório de Pesquisas em Fotônica e Redes (*Photonics and Networking Research Laboratory – PNRL*) da Universidade de Stanford, e envolveu estudos sobre o funcionamento e composição interna do modelo, desenvolvimento e operação de um novo módulo de agendamento, integração do módulo HGS-PQ com o módulo já existente do OLT e avaliação dos algoritmos em diferentes cenários e configurações.

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O Capítulo 2 apresenta uma contextualização geral sobre as redes ópticas passivas e sua próxima geração. Inicialmente são apresentadas questões gerais referentes à sua arquitetura, componentes e topologias. Em seguida são apresentados os padrões TDM-PONs e suas principais características. Por fim são apresentados os aspectos referentes às NG-PONs, destacando a tecnologia WDM-PON, foco desta dissertação. São descritos seus componentes, diferentes arquiteturas propostas na literatura, principais desafios e questões que justificam seu investimento.

O Capítulo 3 apresenta um estudo sobre o gerenciamento de recursos em WDM-PONs. Inicialmente são descritos as principais questões relacionadas ao processo de negociação de recursos, seus protocolos e mensagens de sinalização. Em seguida são

detalhadas as abordagens referentes ao agendamento de *grants*, apresentando os principais modelos, notações e teorias de agendamento. Por fim, são abordadas as principais questões relacionadas à alocação de largura de banda, apresentando as principais categorias e características dos algoritmos de alocação dinâmica de banda DBA.

O Capítulo 4 detalha a proposta do algoritmo de agendamento HGS-PQ. Inicialmente é apresentada uma breve introdução da proposta, os trabalhos relacionados e as características da arquitetura a ser gerenciada pelo algoritmo proposto. Em seguida são descritos os principais aspectos da proposta para o agendamento dos tráfegos *upstream* e *downstream* e o tratamento do algoritmo referente ao gerenciamento de recursos no OLT. Encerra-se o capítulo com uma síntese dos algoritmos já propostos na literatura para a arquitetura adotada.

O Capítulo 5 apresenta a análise da proposta. Primeiramente é realizada uma análise comparativa teórica do algoritmo HGS-PQ com os algoritmos existentes para a arquitetura SUCCESS-HPON. Em seguida, são descritos os cenários, metodologia e parâmetros utilizados no ambiente de simulação computacional desenvolvido. Por fim, são apresentados os resultados obtidos através das simulações.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas no desenvolvimento da proposta e sugere trabalhos futuros.

## 2 REDES ÓPTICAS PASSIVAS E SUA PRÓXIMA GERAÇÃO

### 2.1 INTRODUÇÃO

Como mencionado no Capítulo 1, as Redes Ópticas Passivas (PONs) ganharam bastante atenção nas últimas décadas pela indústria das telecomunicações por serem consideradas uma excelente solução para o problema do gargalo nas redes de acesso. Dentre as principais vantagens, quando comparada às demais tecnologias, pode-se citar a maior quantidade de largura de banda oferecida, maiores distâncias entre a central e os usuários, custo operacional e financeiro de infra-estrutura externa reduzidos por não apresentar componentes eletrônicos, alta confiabilidade por utilizar componentes passivos livres de erros e escalabilidade, pois permitem aumentar a taxa de bits ou operar com comprimentos de ondas adicionais.

Seus padrões mais difundidos, EPON e GPON, deverão coexistir no futuro à medida que evoluem para sua próxima geração, as chamadas *Next-Generation* PONs (NG-PONs), que surgem para solucionar as principais limitações das TDM-PONs através de parâmetros de desempenho mais elevados, como por exemplo, maior largura de banda por assinante, maior escalabilidade, maior distância entre os usuários e o CO, oferecendo suporte às aplicações e serviços de próxima geração e viabilizando a unificação das redes de acesso, metro e de *backhaul* a fim de reduzir custos. É neste cenário que ganham destaque as WDM-PONs.

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos e características das redes ópticas passivas e de sua próxima geração. Inicialmente o capítulo apresenta a arquitetura, principais componentes e topologias. Em seguida são apresentados os padrões TDM-PONs, destacando suas especificações. Por fim são apresentadas as principais questões que envolvem as NG-PONs, com atenção especial às WDM-PONs, foco desta dissertação. São descritos seus componentes, principais desafios, diferentes arquiteturas propostas na literatura e questões que justificam seu investimento.



## 2.2 ARQUITETURA GERAL

As PONs consistem em uma rede de distribuição óptica (*Optical Distribution Network* – ODN) interligada em configuração ponto-multiponto (*point-to-multipoint* – P2MP) somente com componentes ópticos passivos entre os assinantes e o CO das empresas de telecomunicações (Figura 2). O termo passivo origina-se da principal característica desta rede, uma vez que não existem elementos ativos, isto é, elementos que necessitem de energia elétrica para seu funcionamento. A arquitetura PON compartilha os elementos de rede com um dado número de assinantes, possibilitando ao provedor de serviços dividir os custos de instalação e de operação. Como não há elemento ativo localizado na planta externa de fibra óptica, a manutenção no campo é simplificada e, portanto, o custo operacional é reduzido.

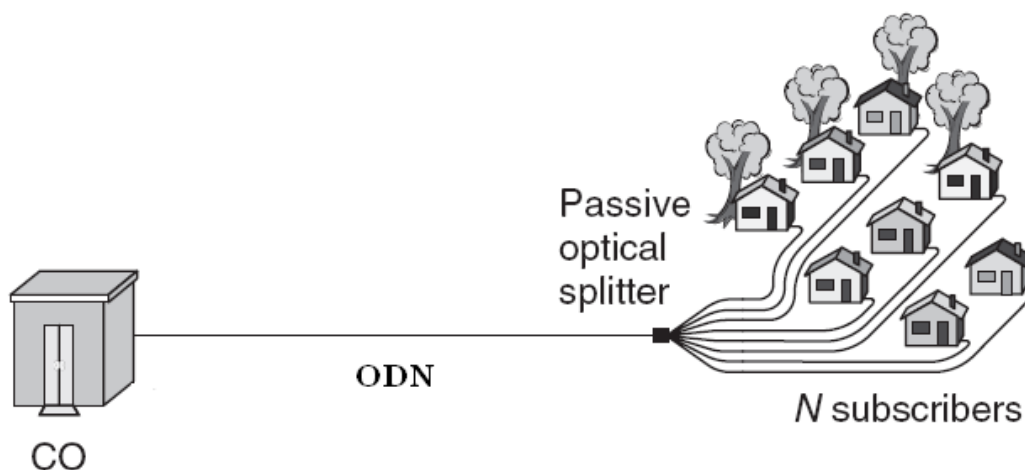


Figura 2 – Arquitetura Básica das Redes Ópticas Passivas [Kramer, 2005]

Todas as transmissões em uma PON são realizadas entre o *Optical Line Terminal* (OLT), residente no CO do provedor de serviços, e a *Optical Network Unit* (ONU), localizada nas proximidades do usuário. A Figura 3 apresenta as abordagens de aproximação das ONUs, ou seja, estratégias de trazer a fibra óptica cada vez mais próxima do usuário e consequentemente diminuir o volume e extensão da rede metálica nas redes de acesso.

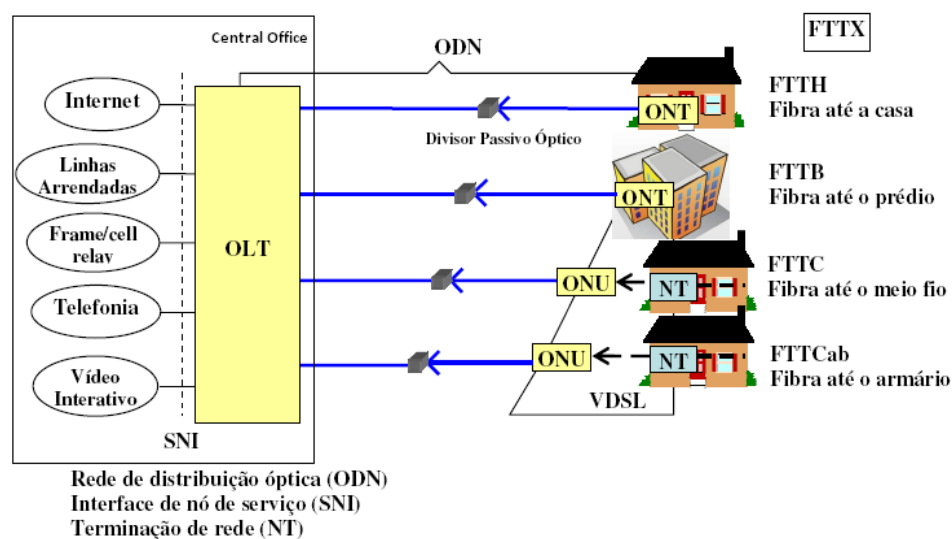


Figura 3 –Abordagens FTTx [Arbieto, 2007]

O primeiro estágio Fiber-to-the-Cabinet (FTTCab) consiste no equipamento ONU localizado em um armário de distribuição situado em um pedestal na calçada ou fixado em um poste de telefonia ou de energia elétrica. O segundo estágio denominado Fiber-to-the-Curb (FTTC), caracteriza-se pela ONU situada no quarteirão do usuário, ou seja, nas suas imediações. O último estágio Fiber-to-the-Home/Building (FTTH/B) consiste na ONU instalada dentro do ambiente do usuário, condição em que a rede de acesso está constituída totalmente por fibra óptica. Neste caso a ONU recebe a denominação de Optical Network Terminal (ONT) [Takeuti, 2005].

O OLT é um equipamento que disponibiliza os serviços para os usuários finais e controla a qualidade do serviço (Quality of Service - QoS), classe de serviços (Class of Service – CoS) e os níveis de serviço (Service-level Agreements - SLA). É o elemento que realiza a multiplexação dos diferentes usuários na fibra óptica. A primeira geração de PONs operava de forma muito semelhante ao TDM, onde a banda é deterministicamente alocada para o usuário. Com a evolução das gerações de PONs, a alocação de banda se tornou dinâmica e passou a considerar o perfil do tráfego.

A ONU é o equipamento que converte o sinal óptico do OLT para as portas padrões dos equipamentos de aplicação do usuário final (ATM, Ethernet, IP). A sua principal função é fornecer acesso aos usuários concentrando o tráfego até que possa transmiti-los.

O divisor passivo, ou *splitter*, é um dispositivo capaz de combinar e dividir o sinal óptico. Em sentido *downstream*, divide o sinal de entrada e o direciona para todas as portas de saída que estão ligadas às ONUs. O sentido *upstream* combina todos os sinais enviados das

ONUs ao OLT. Cada ONU estabelece comunicação direta com o OLT, mas não com as demais ONUs.

### 2.3 TOPOLOGIAS

As PONs podem ser implementadas utilizando topologias distintas dependendo de sua finalidade. A Figura 4 apresenta três destas topologias. A topologia em árvore (a) apresenta o OLT conectado a um divisor óptico passivo e por meio deste todas as ONUs são interligadas, configurando uma topologia ponto-multiponto no sentido *downstream* e ponto-a-ponto no sentido *upstream*. Esta topologia tem como principal vantagem o seu custo por utilizar componentes passivos. Na topologia em barramento (b), as ONUs são conectadas a vários divisores passivos criando dois segmentos, um conectado a ONU e o outro ao próximo divisor passivo. Esta topologia é interessante em abordagens FTTC onde a fibra se aproxima até o armário de distribuição, e em seguida aos usuários finais. Já na topologia em anel (c), as ONUs são conectadas ao OLT através de dois segmentos de forma serial formando um barramento óptico. Sua principal vantagem é a proteção, pois caso ocorra uma falha na fibra, o tráfego pode ser direcionado para o outro sentido.

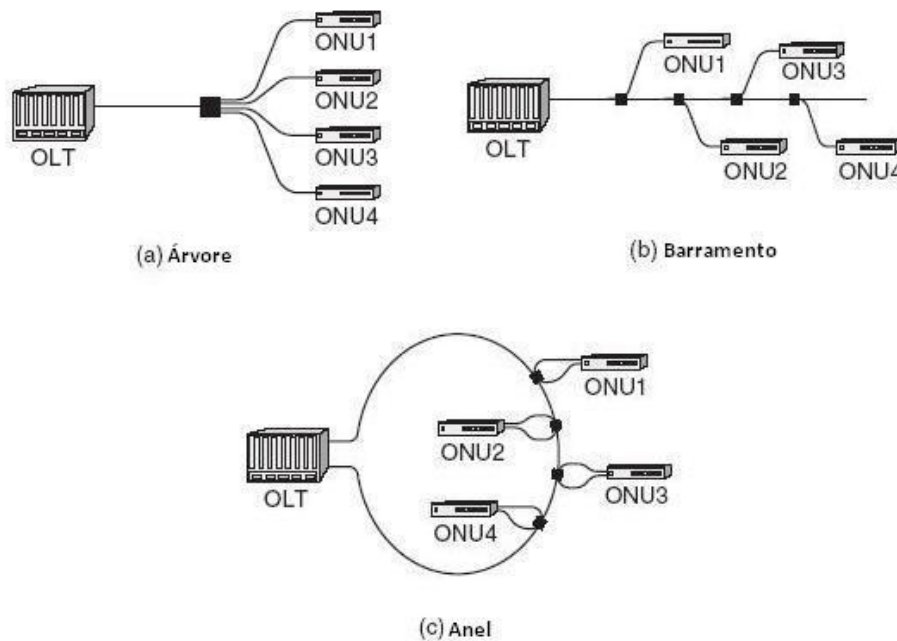


Figura 4 – Topologias PONs [Kramer, 2005]

## 2.4 TDM-PONs

Atualmente, a solução de acesso óptico mais difundida no mundo são as TDM-PONs [Frost & Sullivam, 2009], as quais combinam alta capacidade das fibras ópticas com o baixo custo na instalação e manutenção da infra-estrutura passiva. Possui como grande vantagem o fato de utilizar somente um tipo de equipamento transceptor para todas as ONUs, transmitindo em um único comprimento de onda, o que reduz custos e facilita a manutenção e operação do sistema.

Todo o controle das transmissões é realizado pelo OLT, que indica o instante em que a ONU deve enviar os seus dados, bem como a largura de banda disponibilizada para sua transmissão, podendo ser estabelecida com base na necessidade, que é verificada periodicamente, ou em contratos de serviço (SLA) negociados com o provedor. De forma complementar, as ONUs devem negociar com o OLT quando elas podem transmitir seus dados, levando em consideração as diferentes distâncias que podem existir entre elas. A distância máxima entre o CO e as ONUs nestas redes geralmente é de 20 km

Cada ONU transmite seus dados upstream em uma janela de transmissão, ou timeslot, a fim de evitar colisões no canal óptico. O splitter atua como um combinador/divisor de potências, sendo o responsável por combinar as seqüências de dados e mandar todas as informações ao OLT. A portadora óptica é compartilhada pelos assinantes, e por consequência, a quantidade de ONUs é limitada em função da atenuação do splitter e das taxas de bits que operam nos transceivers do OLT e das ONUs.

Já em transmissões no sentido downstream, as ONU recebem toda as informações originadas pelo OLT via broadcast e filtram os dados que lhe são destinados. As Figuras 5 e 6 representam as transmissões downstream e upstream, respectivamente.

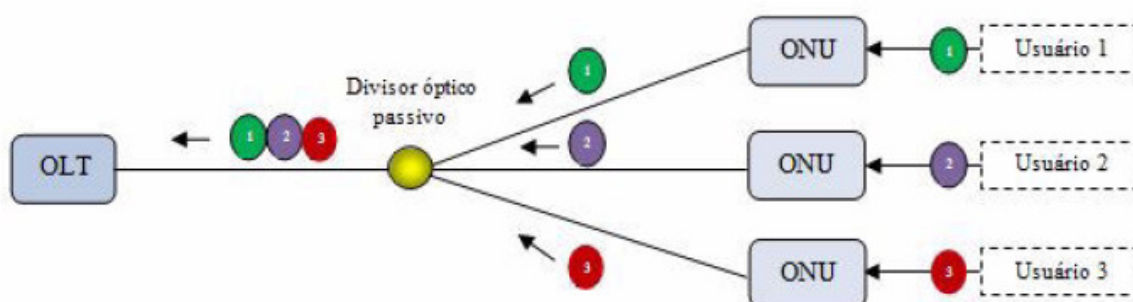


Figura 5 – Alocação do Tráfego Downstream [Silva, 2010]

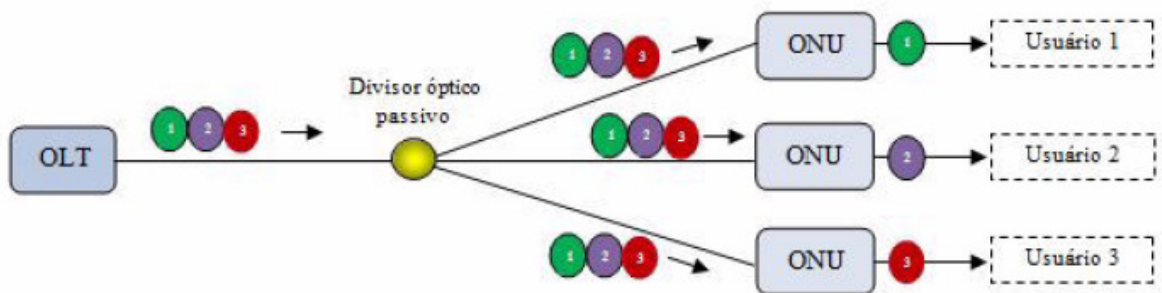


Figura 6 – Alocação do Tráfego Upstream [Silva, 2010]

A evolução das TDM-PONs levou à especificação de três padrões. ATM-PON (APON baseada em ATM, Broadband-PON (BPON, baseada nas APONs, adicionando suporte a WDM para transmissão bidirecional e maior largura de banda), Ethernet-PON (EPON) e Gigabit-PON (GPON, evolução do BPON, suportando maiores taxas de transmissão e múltiplos protocolos de camada 2).

#### 2.4.1 APON e BPON

Proposta em 1997, a primeira especificação para APON utilizava o ATM como protocolo de camada 2 com a finalidade de otimizar a transmissão dos serviços de voz e dados e ao mesmo tempo garantir QoS em conversações telefônicas utilizando células tamanho fixo de 53 bytes. Este primeiro padrão, mais tarde aprovado pela União Internacional de Telecomunicações ITU-T na especificação G.983.1, especifica a arquitetura APON com uma taxa de bits simétrica de 155 Mbps *upstream* e 622 Mbps *downstream*, assim como a transmissão simétrica de 622 Mbps. O nome APON foi logo substituído pelo padrão PON de banda larga, ou BPON, com a finalidade de enfatizar que não era limitado somente ao tráfego ATM [Arbieto, 2007]. O padrão BPON especifica desde a camada física até as tarefas de operação, administração, manutenção e provisionamento (OAM&P).

## 2.4.2 EPON

Em janeiro de 2001, o IEEE fundou um grupo de trabalho denominado *Ethernet* na primeira milha (*Ethernet in the First Mile – EFM*). O objetivo deste grupo é ampliar a aplicação de *Ethernet* às redes de acesso dos assinante, aproveitando as características de baixo custo e simplicidade desta arquitetura para possibilitar a utilização de tecnologia de menor custo em PONs. A EPON transporta os dados encapsulados em quadros *Ethernet*, que facilita o transporte dos pacotes IP e a operabilidade entre LANs *Ethernet* instaladas. As redes EPON estão especificadas no padrão IEEE 802.3ah, compreendendo a camada física e camada de enlace de dados, sendo sua taxa máxima de transmissão 1 Gbps [Arbieto, 2007].

## 2.4.3 GPON

Baseada nas recomendações do FSAN, entre 2003 e 2004 a arquitetura GPON foi elaborada e aprovada pela ITU-T através do padrão G.984, resultando em uma série de especificações. Operam em taxas de dados de 1,25 Gbps e 2,5 Gbps em sentido downstream e 155 Mbps, 622 Mbps, 1,5 Gbps e 2,5 Gbps em sentido upstream [Kramer, 2005]. Sua principal característica é realizar o encapsulamento dos dados através de um protocolo genérico de formatação de quadros (Generic Framing Protocol - GFP), tornando-se flexível tanto para tráfegos em rajada quanto em taxas de bit constante (Constant Bit Rate – CBR). A arquitetura GPON pode operar em modo de quadros Ethernet, em modo de células ATM ou em modo misto.

## 2.4.4 Comparação entre os Padrões

Grande parte das implementações FTTH/FTTB são baseadas em TDM-PONs e o principal motivo para esta alternativa está diretamente relacionada aos seus custos reduzidos e

principalmente por utilizar componentes passivos em sua planta externa. Estas tecnologias oferecem vantagens operacionais e financeiras quando comparadas com redes ópticas ativas (Active Optical Networks – AON) e por isso seus padrões foram amplamente difundidos em diferentes mercados ao redor do mundo. A Tabela 1 apresenta as especificações dos padrões TDM-PON.

Tabela 1 – Padrões TDM-PON e suas especificações [Abrams, 2005].

Arquiteturas	APON/BPON	EPON	GPON
Padrões	ITU.T G.983	IEEE 803.ah	ITU.T G.984
Tamanho de células do pacote de dados	53 bytes	Variável de 64 bytes até 1518 bytes	Variável de 53 bytes até 1518 bytes
Largura de banda máxima	622 Mbps	1 Gbps	2,5 Gbps.
Quadro	ATM	Ethernet	GFP/ATM
Comprimento de onda <i>downstream</i>	1480 nm a 1500 nm	1490 nm ou 1510 nm	1480 nm a 1500 nm
Comprimento de onda <i>upstream</i>	1260 nm a 1360 nm	1310 nm	1260 nm a 1360 nm
Tráfego Voz	TDM	VoIP ou TDM	TDM
Tráfego Vídeo	1550 nm (RF)	1550 nm (RF/IP)	RF/IP
Usuários na PON	32	16/32	64
Largura de banda média por usuário	20 Mbps	60 Mbps/ 30 Mbps	40 Mbps
Custos estimados	Baixo	Mais baixo	Médio

Em sua concepção, esperava-se que a tecnologia ATM se tornasse predominante nas redes locais, metropolitanas e de longa distância, entretanto, em função dos altos custos dos equipamentos e de sua alta complexidade, o padrão ATM não teve o mesmo sucesso nas redes locais quanto a tecnologia Ethernet, ainda predominante. Após algum tempo, várias operadoras instalaram sistemas BPON, porém a previsão de implantação em grandes

quantidades e a correspondente redução dos custos dos equipamentos não ocorreram. [Arbieto, 2007].

Atualmente, os padrões TDM-PONs mais disseminados são o GPON, que vem ganhando significativo destaque especialmente em mercados emergentes e o EPON, largamente implantado no mercado asiático, primeiro a implantar soluções FTTB ainda durante a década de 90. Várias empresas de telecomunicações asiáticas já trabalham com ambas as soluções, o que indica um forte crescimento do padrão GPON também nestes países [Frost & Sullivan, 2009].

## 2.5 NG-PONs

A demanda por largura de banda pelo usuário final aumenta significativamente em função de novas aplicações e serviços de próxima geração, como aplicações simétricas em tempo real HD, videoconferência, broadcast, entre outros. Esta largura de banda possui crescimento exponencial e deve ser tratada por redes de acesso de próxima geração com grande capacidade e custo atrativo.

Em função dos avanços tecnológicos, principalmente dos equipamentos de transmissão óptica, a indústria de telecomunicações vem trabalhando no desenvolvimento de tecnologias e padrões que vão além das tradicionais TDM-PONs a fim de prover maior capacidade de transmissão, maior alcance, melhorias na operação, suporte a serviços de próxima geração e redução de custos operacionais e financeiros [Heron et al., 2009]. Neste cenário incluem-se tecnologias como XG-PONs, 10G-EPONs e WDM-PONs.

### 2.5.1 Padrões IEEE 802.3av e ITU-T G.987

O padrão IEEE 802.3av, aprovado em setembro de 2009, busca melhorar a capacidade de transmissão das TDM-EPONs para 10 Gbps mantendo intacta sua camada lógica. Além de manter total compatibilidade com o padrão legado, este padrão procura



atender os assinantes da rede de acesso a uma distância máxima de 20 km do CO, utilizando topologias P2MP e suportando duas abordagens para os tipos de taxas de transmissão em fibra monomodo:

- Abordagem simétrica, com 10 Gbps tanto para transmissões *downstream* quanto *upstream*;
- Abordagem assimétrica, com 10 Gbps em transmissões *downstream* e 1 Gbps em transmissões *upstream*.

Dois grupos guiam as pesquisas em NG-PONs no FSAN/ITU. O grupo NG-PON1 trabalha em tecnologias que possam coexistir com o padrão GPON e todo o seu legado. Neste grupo destacam-se as XG-PONs, especificadas no padrão ITU-T G.987, e aprovadas em janeiro de 2010, com transmissões *downstream* de 10 Gbps e *upstream* de 2,5 Gbps. Também estão incluídas neste grupo as XG-PON2, onde todos os esforços são focados para a transmissão simétrica de 10 Gbps, as XG-PONs híbridas utilizando o WDM como suporte e integração e as *Long Reach* XG-PONs, que focam no aumento da área de abrangência entre o CO e os assinantes. Já o grupo NG-PON2 trabalha em tecnologias independentes do padrão GPON, sem considerar sua rede de distribuição óptica legada, grupo onde se destacam as WDM-PONs. A Figura 7 apresenta os grupos de pesquisa FSAN/ITU.

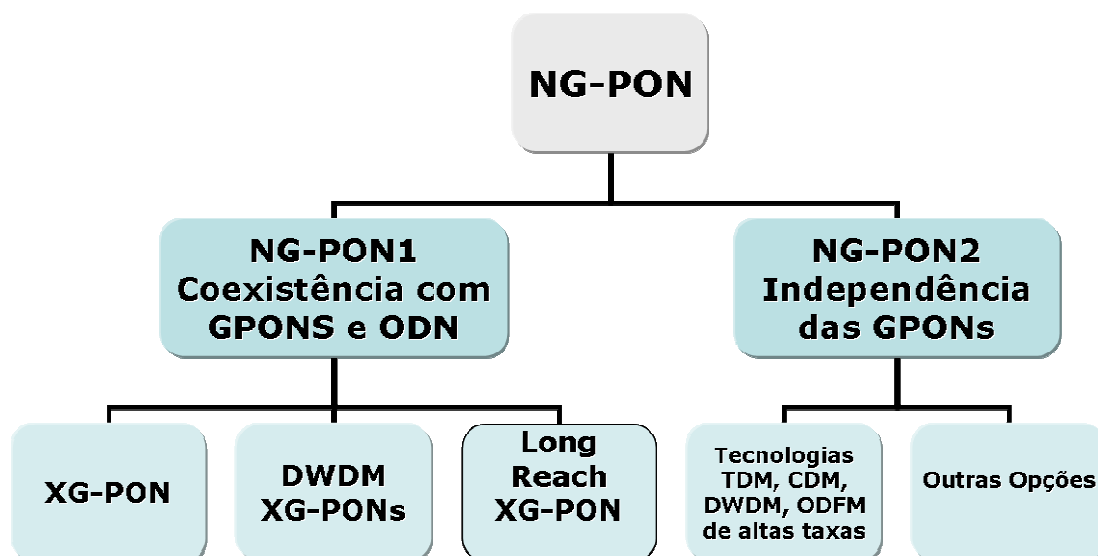


Figura 7 – Grupos FSAN NG-PON

## 2.5.2 WDM-PONs

As WDM-PONs combinam a eficiência e baixo custo das PONs com a grande largura de banda e outros benefícios providos pelo WDM. Sua grande finalidade é interligar os assinantes ao CO através de canais de comprimentos de ondas diferentes, tanto no sentido *upstream* quanto no sentido *downstream*, podendo operar em taxas diferentes e com uma variedade de serviços na mesma infra-estrutura.

Por não compartilhar o comprimento de onda por vários assinantes, este esquema provê maior potência óptica, maior escalabilidade e maior largura de banda ao usuário. Pode ser utilizada como uma rede ponto-a-ponto, onde um comprimento de onda é dedicado por cliente, ou como uma rede P2MP. A Figura 8 apresenta a arquitetura básica das WDM-PONs.

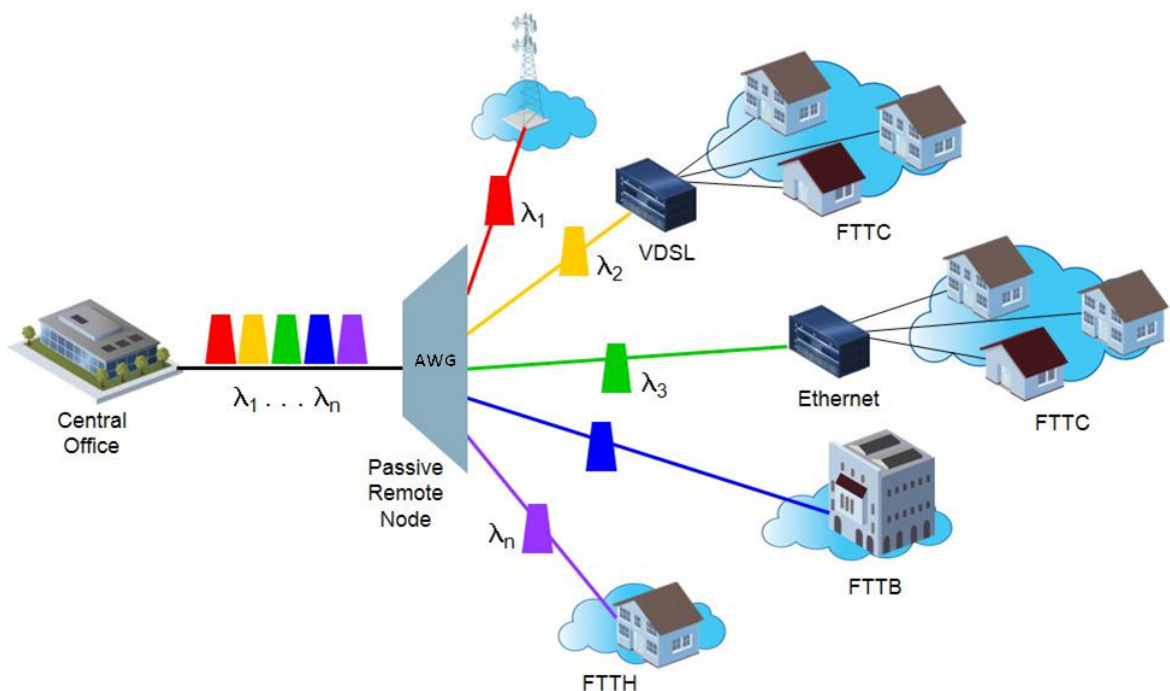


Figura 8 – Arquitetura WDM-PON [Ritter, 2010]

Um dos seus principais componentes é o *Arrayed Waveguide Grating* (AWG), implantado em um nó remoto (RN) e com funcionalidade semelhante ao *splitter*, presente nas TDM-PONs. O AWG possui grande sucesso na indústria WDM por ser utilizado em grande escala em redes de longa distancia como multiplexador/demultiplexador (MUX/DEMUX) e

também como um *Add-Drop Multiplexer* (ADM), direcionando cada comprimento de onda para uma única porta de saída.

Uma fonte de múltiplos comprimentos de onda no OLT é utilizada para transmitir os dados que são roteados para as ONUs em sentido *downstream*. Por outro lado, no sentido *upstream*, o OLT utiliza um DEMUX WDM e um conjunto de receptores para receber o sinal originado pelas ONUs.

Por operarem em comprimentos de onda diferentes, as ONUs são chamadas de *colored*, tornando a implementação deste tipo de rede mais complexa quando comparada às TDM-PON, onde todos os equipamentos usam o mesmo comprimento de onda tanto para transmitir quanto para receber dados [Mukherjee, 2006]. Para solucionar este problema, torna-se fundamental a pesquisa e o desenvolvimento de ONUs de baixo custo denominadas *colorless*, ou seja, que não operam em um determinado comprimento de onda específico. Estas ONUs são fundamentais para redução dos custos de operação, administração e manutenção (AOM) das WDM-PONs e facilitam a produção em massa por apresentarem uma única especificação.

Alguns projetos e pesquisas também trabalham na expansão do alcance geográfico das redes de acesso para 100 km, mantendo altas taxas de divisão (*split-ratio*) e, conseqüentemente, agregando uma grande quantidade de usuários. São as chamadas WDM-PONs de longo alcance (*Long Reach WDM-PONs*), que contribuem para a simplificação das redes de telecomunicações por possibilitarem a unificação das redes de acesso, metropolitanas e de *backhaul*, proporcionando economia para as empresas de telecomunicações ao reduzir a quantidade de nós e de interfaces. A Figura 9 apresenta este esquema de simplificação para redes de telecomunicações.

A arquitetura básica das WDM-PONs de longo alcance é apresentada na Figura 10. Estas redes caracterizam-se por possuírem uma central local (*Local Exchange – LE*) que localizam-se em torno de 10 km das ONUs [Mukherjee, 2006] . O sinal óptico propaga-se pela fibra formando um tronco de distribuição óptica (*feeder*) de 100 km entre o CO e o LE. Em seguida, a fibra é dividida e conectada a uma grande quantidade de ONUs. Em geral, uma das abordagens para compensar a perda do sinal em função da longa distância e alta taxa de divisão, é utilizar amplificadores ópticos em ambas as centrais.

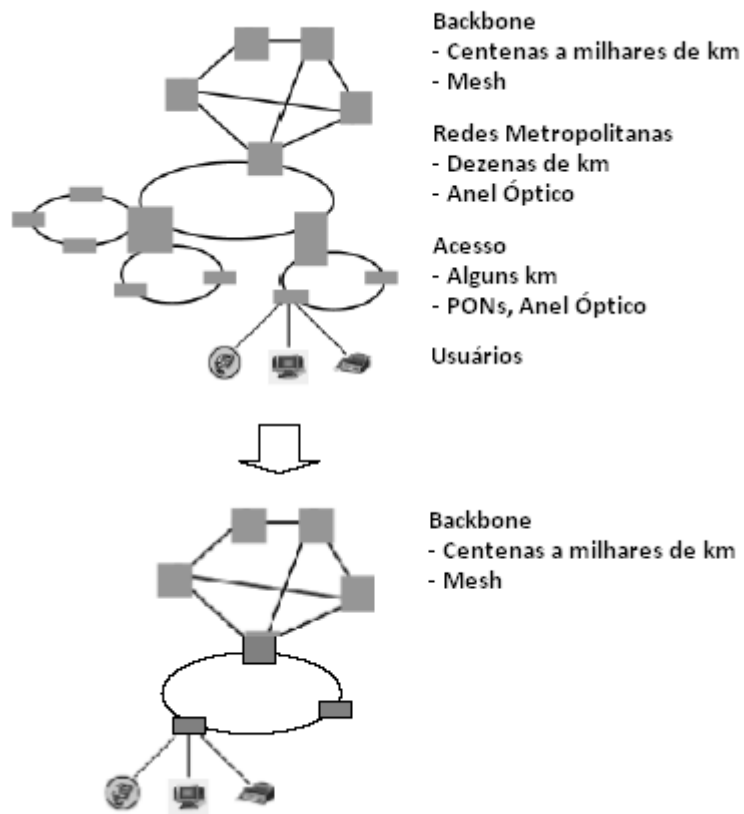


Figura 9 – Simplificação das redes de telecomunicações [Mukherjee, 2006]

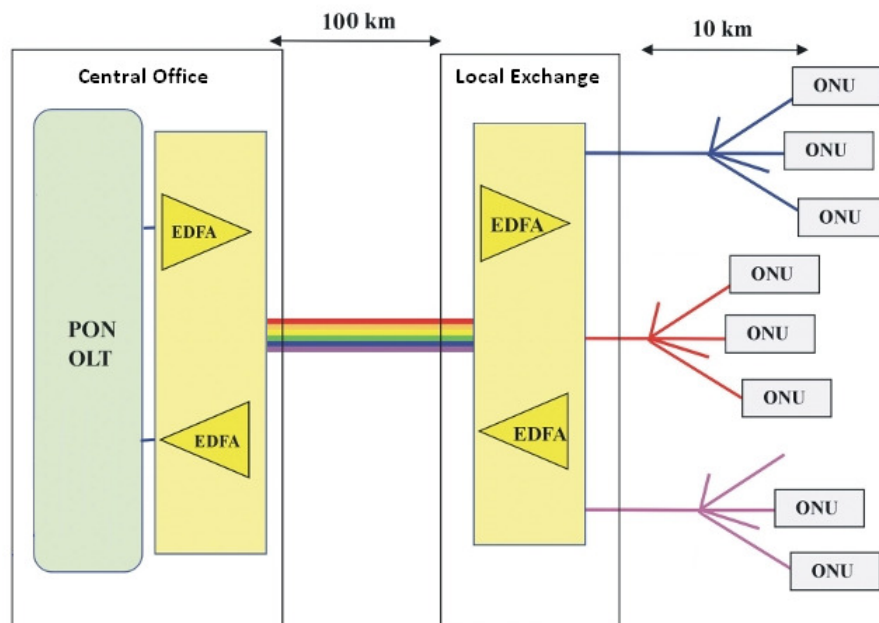


Figura 10 – Arquitetura básica das WDM-PONs de longa distância.

Com o aumento da maturidade de algumas tecnologias e com a redução dos custos de implantação, as WDM-PONs deverão estar no ponto de consideração para distribuição comercial em larga escala. Por se tratar de uma tecnologia ainda não padronizada, diversos são os tópicos de pesquisa em WDM-PONs. Estudos por equipamentos de baixo custo, arquiteturas com propostas de migração das atuais TDM-PONs utilizando ONUs *colorless*, esquemas de proteção, restauração e localização de falhas e alocação do tráfego *upstream* são alguns deles.

### 2.5.2.1 Principais Desafios de Pesquisa

Um dos principais tópicos de pesquisas em WDM-PONs relaciona-se à pesquisa de equipamentos de custo/benefício apropriado para as redes de acesso. Para implantação de uma rede WDM-PON deve-se analisar e decidir os comprimentos de onda a serem utilizados bem como os seus espaçamentos, transmissores, tipos de lasers, amplificadores, receptores, multiplexadores e demultiplexadores, tanto para o OLT quanto para as ONUs.

Em sua variação de longa distância, a compensação da potência do sinal também é considerada um dos desafios de pesquisa, pois amplificadores ópticos introduzem um efeito denominado *amplified spontaneous emission* (ASE), ruído produzido pela emissão espontânea e que pode ter efeito negativo sobre o desempenho do sistema por afetar a relação sinal ruído (SNR). Trabalhos propõem soluções de duplo estágio de amplificação intermediária para manter o SNR a um nível elevado [Deventer et al, 1996]. Outro desafio é referente à amplificação de fibra dopada com érbio (EDFA), que, apesar de possuir grandes vantagens, apresenta baixa velocidade para o ambiente em rajadas das redes de acesso. Pesquisas investigam o *semiconductor optical amplifier* (SOA) como solução para este problema [Suzuki, 2007].

Várias propostas na literatura abordam a utilização de diversos tipos de fontes ópticas, como do vetor de lasers DFB (*Distributed Feedback Laser*), laser multifrequência e de fontes ópticas sintonizáveis em comprimento de onda [Maquino, 2007]. Uma opção que vem sendo amplamente estudada atualmente é o travamento (*injection-locking*) de diodos *lasers Fabry-Pérot* (F-P LD) através da injeção do sinal de ASE de um EDFA. Algumas pesquisas também procuram eliminar fontes ópticas nas ONUs a fim de reduzir custos no

equipamento e tirar destes a responsabilidade de gerenciar a transmissão no comprimento de onda [Kim et al, 2005]. Fontes ópticas compartilhadas ficam localizadas no OLT enquanto as ONUs somente realizam modulação das ondas. Amplificadores SOA são geralmente utilizados para esta finalidade.

Outro desafio é relacionado ao desenvolvimento de receptores em modo de rajada. As diferentes distâncias entre ONUs e OLT produzem diferentes atenuações dos sinais originados pela ONU, o que resulta em variados níveis DC. Um receptor em modo de rajada é necessário para esta situação e deve incluir controle de ganho automático (*Automatic Gain Control* - AGC) e recuperação de sincronismo e de dados (*Clock and Data Recovery* - CDR).

Em se tratando de detecção e localização de falhas nas fibras, é fundamental que estas ações sejam feitas com o menor atraso possível. Em geral, um instrumento denominado *Optical Time-Domain Reflectometer* (OTDR) é o mais utilizado para testes de atenuação em fibras ópticas. É utilizado para medir atenuação na emenda, atenuação total em trechos de fibra, reflectância, distância à falha ou à emenda e o comprimento da fibra em teste. Entretanto, um OTDR convencional opera em apenas um único comprimento de onda. Desta maneira, não é viável sua utilização em WDM-PONs em função da presença do AWG, componente seletor de comprimentos de onda localizado no nó remoto.

Algoritmos de alocação dinâmica de banda e comprimento de onda também precisam ser desenvolvidos a fim de gerenciar os recursos da rede de forma inteligente a fim de minimizar o impacto das grandes distâncias e proporcionar um bom desempenho na alocação dos tráfegos *upstream* e *downstream*. Protocolos da camada de enlace, como a extensão do *Multipoint Control Protocol* (MPCP) para WDM-PONs, não especificam nenhum tipo particular de algoritmo DBA, servindo apenas como um *framework* para implementação.

Alguns projetos de pesquisa ao redor do mundo envolvem universidades e fabricantes de equipamentos no estudo de arquiteturas onde são testadas e avaliadas as possíveis soluções para estes e muitos outros desafios em WDM-PONs. A seguir são apresentados e descritos alguns destes projetos e suas principais características.

### 2.5.2.2 Projetos e Arquiteturas

Uma arquitetura de longo alcance denominada *Photonic Local Access NETWORK* (PLANET) [Voorde et al., 2000] foi proposta pelo projeto *Advanced Communications and Technologies and Services* (ACTS). O fator de divisão nesta rede é alto, suportando uma quantidade de 2048 usuários a uma cobertura de 100 km. O sistema de transporte foi baseado em células ATM a taxas de 2.5 Gbps distribuídas pelas ONUs através do TDM.

Outra proposta relacionada é a SuperPON [Shea & Mitchell, 2007], da *British Telecom*, que possui uma extensão de 135 km e que opera em canais de 2.488 Gbps *downstream* e 1.244 Gbps *upstream*. Esta rede opera com 40 comprimentos de onda a uma taxa de divisão de 64, suportando 2560 ONUs.

Já a arquitetura denominada *Single-fiber Advanced Ring Dense Access Network Architecture* (SARDANA) [Lazaro et al, 2007] busca suportar 1024 usuários por PON a longas distâncias, com canais *downstream* de 10 Gbps e amplificação passiva. Esta arquitetura apresenta topologia em anel e opera com 32 comprimentos de onda. Também propõe um esquema de proteção através dos nós remotos.

A arquitetura híbrida DWDM-PON proposta pela Universidade de College suporta múltiplos comprimentos de onda, onde cada par suporta uma PON de 100 km em uma taxa upstream de 10 Gbps [Talli, 2006]. Esta rede opera através de 17 comprimentos de onda e pode suportar 4352 usuários.

A arquitetura PIEMAN também atinge distância máxima de 100 km e opera com 32 comprimentos de onda [Talli, 2007]. Cada canal de 10 Gbps é exclusivamente alocado para uma PON com taxa de divisão de 512, o que proporciona 16384 usuários a uma taxa média de 20 Mbps.

Um instituto coreano com fundo de pesquisa governamental chamado ETRI propôs uma solução híbrida de LR-PON, chamada WDM-E-PON (WE-PON), onde 16 comprimentos de onda são transmitidos em um anel óptico com taxa de divisão de 1:32, acomodando a quantidade de 512 usuários.

A arquitetura *Stanford University aCESS Hybrid PON* (SUCCESS-HPON) [An et al., 2004] baseia-se em uma topologia em anel e diversas estrelas conectando o CO às ONUs. Utiliza tecnologias Coarse WDM (CWDM) e Dense WDM (DWDM) e cada ONU possui seu próprio comprimento de onda dedicado para ambas as transmissões *upstream* e

*downstream* em uma grade DWDM para se comunicar com a OLT. A comunicação é *half-duplex*, pois a OLT utiliza lasers ajustáveis para *frames downstream* e também para *frames upstream* modulados pelas ONUs. Em [Kim et al., 2005], foram propostos algoritmos de agendamento para gerenciamento dos recursos e alocação do tráfego nesta arquitetura.

A Tabela 2 apresenta as principais características destas arquiteturas. No Capítulo 3 serão abordadas as principais questões relacionadas ao gerenciamento de recursos e alocação dos tráfegos em WDM-PONs.

Tabela 2 – Principais Arquiteturas WDM-PONs.

Arquitetura	Protocolo	Alcance	Comprimento de Onda	Taxas (down/up)	ONUs
PLANET	APON	100	1	2.5/0.311	2048
SuperPON	GPON	135	40	2.5/1.25	2560
SARDANA	G/EPON	100	32	10/2.5	1024
Hybrid PON		100	17	10/10	4352
PIEMAN		100	32	10/10	16384
WE-PON	G/EPON	100	16	2.5/2.5	512
SUCCESS-HPON		20	4 * 16	10/10	4 * 16



### 3 GERENCIAMENTO DE RECURSOS EM WDM-PONS

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Em WDM-PONs, uma das funções mais importantes para sua alta eficiência e funcionalidade do sistema é o controle e o gerenciamento inteligente dos seus recursos pelo OLT. Entre os processos que envolvem o estabelecimento deste controle inteligente fazem parte a negociação dos recursos entre os usuários e o CO, o agendamento eficiente dos *grants* para transmissão do tráfego *upstream* e a alocação justa da largura de banda entre os tráfegos.

O compartilhamento dos comprimentos de onda entre os usuários induz à utilização de um protocolo que seja capaz de estabelecer o processo de negociação entre ONUs e OLT e garantir controle na utilização dos transmissores, receptores e filtros WDM. Além deste protocolo básico para negociação, torna-se fundamental a utilização de um algoritmo DBA que mantenha o controle de acesso ao meio (*Media Access Control* - MAC) e que atribua não somente *slots* de tempo mas também comprimentos de onda para a transmissão dos tráfegos. Este mesmo algoritmo também deve buscar eficiência e controle no agendamento dos *grants* para transmissões *upstream* a fim de minimizar os atrasos na rede e garantir justeza na utilização dos canais [Banerjee, 2005].

Devido a ausência de padronização, diversas são as arquiteturas WDM-PONs propostas na literatura e no mercado, e por este motivo, existe um grande leque para a pesquisa e desenvolvimento de algoritmos DBA que devem ser capazes de gerenciar todos os recursos e especificidades de cada uma delas. Neste capítulo serão apresentadas as principais questões referentes ao gerenciamento de recursos em WDM-PONs. Inicialmente será descrito o estágio de negociação de recursos onde serão apresentados os protocolos e mensagens envolvidas neste processo. Em seguida serão abordadas questões a respeito do agendamento dos *grants* para transmissão do tráfego *upstream*, um dos principais desafios em WDM-PONs. Por fim, são apresentados os princípios para alocação da largura de banda, apresentando os métodos e características dos principais algoritmos DBA propostos na literatura.

### 3.2 NEGOCIAÇÃO DE RECURSOS

A negociação de recursos em arquiteturas TDM-PONs consiste na troca de informações entre o OLT e ONUs através mensagens, células ou campos de frames definidos no MAC. Em BPONs, uma célula de 53 bytes para operação, administração e manutenção da camada física (*Physical Layer Operation Administration and Maintenance* - PLOAM) efetua este processo. Em particular, uma ONU reporta o *status* das suas filas através de células PLOAM *upstream*, indicando sua requisição para a próxima transmissão. O OLT notifica a respectiva ONU sobre a decisão de alocação de recursos enviando células PLOAM *downstream* de mesmo tamanho, que por sua vez carrega os *grants* gerados pelo OLT [Luo, 2007]. Um *grant* é uma forma de o OLT permitir a transmissão de uma ONU, informando o tempo de início e a duração de sua transmissão *upstream*.

Em GPONs, uma ONU reporta sua requisição de transmissão *upstream* através de um campo denominado *Dynamic Bandwidth Report upstream* (DBRu), informando o status das suas filas. Em sentido *downstream*, a informação da alocação dos recursos pelo OLT é carregada pelo campo *Physical Control Block downstream* (PCBd). O PCBd é transmitido no início de cada frame GPON *downstream*, notificando a ONU do agendamento da transmissão *upstream* [Luo, 2007].

Já em EPONS, o *Multipoint Control Protocol* (MPCP) é introduzido para suportar a negociação de recursos através de duas mensagens MAC de 64 bytes. A mensagem de REPORT é originada pela ONU para informar o *status* da sua fila e iniciar o processo da transmissão *upstream*. A mensagem GATE é gerada pelo OLT e enviada em sentido *downstream* informando as decisões.

A Figura 11 demonstra a condução da negociação de recursos entre OLT e ONUs e os diferentes tipos de mensagens.

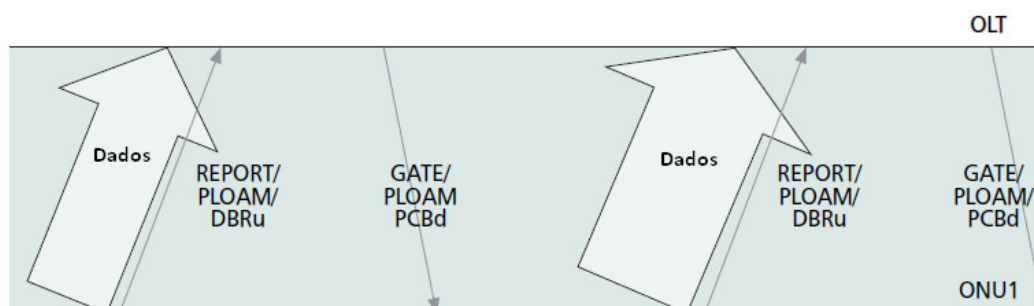


Figura 11 – Mensagens de negociação de recursos [Luo, 2007]

O protocolo MPCP tem sido bastante utilizado em WDM-PONs principalmente por garantir conformidade com o processo evolutivo das TDM-EPONs. Para suportar não apenas alocação de *slots* de tempo mas também comprimentos de onda e garantir que o OLT agende transmissões e recepções nos diversos canais suportados pelas ONUs, algumas extensões WDM relacionadas ao processo de descoberta e registro e coordenação *downstream* e *upstream* foram recomendadas ao MPCP.

### 3.2.1 Descoberta e Registro

O processo de descoberta e registro de ONUs busca compatibilidade com o padrão TDM-EPON, e ocorre quando uma ONU descoberta troca as seguintes informações sobre sua arquitetura WDM com o OLT [McGarry, 2006]:

- *TX\_type* e *RX\_type*: campo com 2 bits indicando o tipo de transmissor e receptor, sendo atribuídos os seguintes valores: 0 = sem WDM, 1= fixos - ajustáveis, 2= ajustáveis, 3= reservados.
- *TX\_tuning\_time* e *RX\_tuning\_time*: 16 bits indicando os tempos de ajuste dos transmissores e receptores, respectivamente, através de um inteiro múltiplo de uma unidade de tempo, como microsegundos (se  $TX\_type/RX\_type = 2$ ).
- *Wavelength\_id\_type*: 1 bit indicando o esquema de codificação dos comprimentos de onda suportados utilizando os seguintes valores: 0= esquema hierárquico de codificação em 2 níveis (identificador de comprimento de onda/*bitmap* com os comprimentos de onda suportados), 1= esquema *flat* de codificação (*bitmap* dos comprimentos de onda suportados).

- *TX\_waveband* e *RX\_waveband*: 4 bits, indicando o identificador da faixa de onda do transmissor e do receptor, respectivamente. As faixas de onda são definidas em conformidade com os espaçamentos especificados no ITU-T G.694.1 (se *Wavelength\_id\_type* = 0).
- *TX\_supported\_wavelengths* e *RX\_supported\_wavelengths*: 16 bits cada (*Wavelength\_id\_type* = 0) ou 128 bits cada (*Wavelength\_id\_type* = 1) indicando o *bitmap* dos canais de comprimento de onda suportados pelo transmissor e receptor, respectivamente. Esta informação é mapeada em campos reservados da unidade de dados do protocolo (PDU) REGISTER\_REQ do MPCP, como apresentado na Figura 12 (a).

### 3.2.2 Coordenação *Upstream* e *Downstream*

Para facilitar a necessidade de o OLT atribuir um canal de comprimento de onda específico para a transmissão *upstream* de uma determinada ONU, um identificador de comprimento de onda de 8 bits (permitindo suportar até 256 comprimentos de onda) é utilizado em todos os *grants* de transmissão através dos campos reservados do GATE MPCPDU, como verificado na Figura 12(b) [McGarry, 2006]. Para permitir com que o OLT (re)configure os comprimentos de ondas recebidos por uma determinada ONU, são utilizadas dois MPCPDUs:

- RX\_CONFIG (Opcode = 00-07);
- RX\_CONFIG\_ACK (Opcode = 00-08).

Em sentido *downstream*, o OLT envia o MPCPDU RX\_CONFIG para (re)configurar os receptores de uma determinada ONU. As ONUs confirmam esta (re)configuração enviando o MPCPDU RX\_CONFIG\_ACK ao OLT. Como ilustrado na Figura 12 (c), o campo *Reception\_wavelengths* do MPCPDU RX\_CONFIG consiste de 16 a 128 bits, dependendo do esquema de codificação aplicado no respectivo campo de *Flags*. [McGarry, 2006]

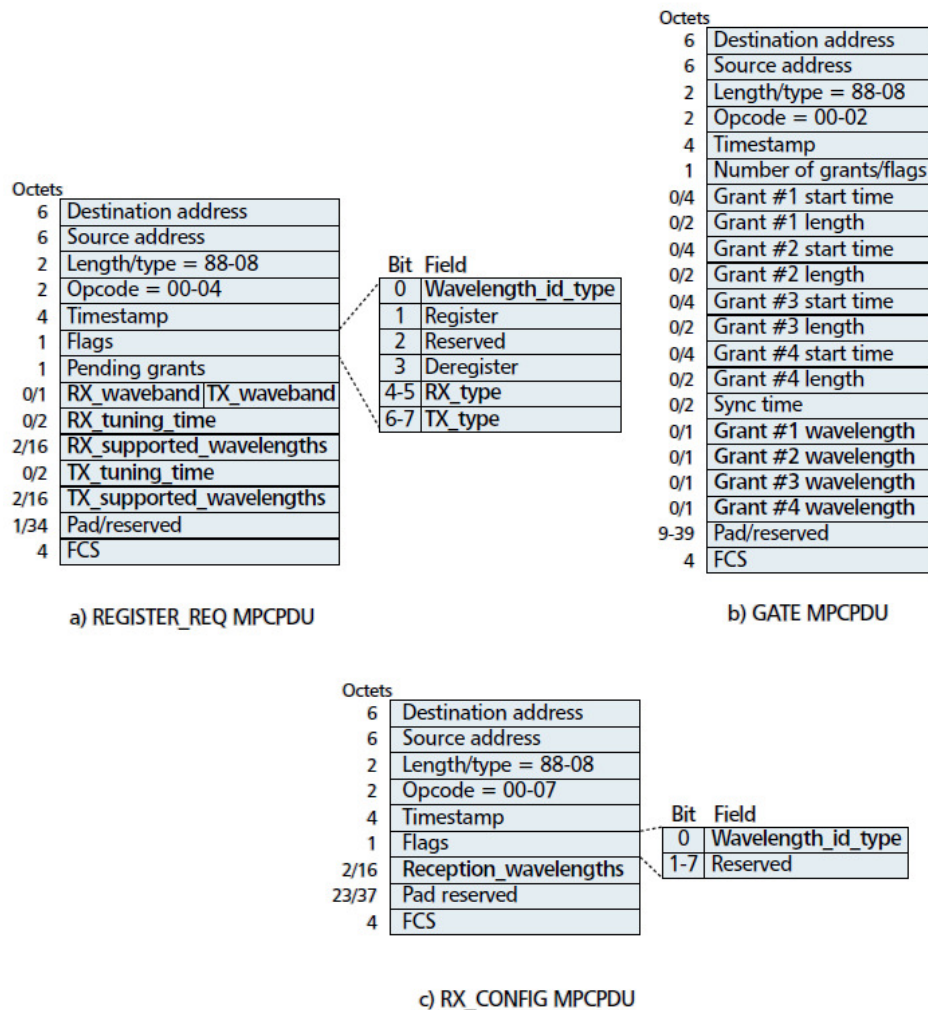


Figura 12 – Extensões WDM propostas para os PDUs MPCP. [McGarry, 2006]

### 3.3 AGENDAMENTO DE GRANTS

Em arquiteturas TDM-PONs, o problema do gerenciamento da largura de banda resume-se ao agendamento do tráfego *upstream* em um único comprimento de onda. Em WDM-PONs, este problema é expandido ao agendamento dos *grants* para transmissões *upstream* nos diferentes comprimentos de onda suportados pela ONU. Em outras palavras, em WDM-PONs, não apenas decisões sobre o tamanho do *grant* ou quando será transmitido, mas também em que comprimento de onda será enviado a fim de utilizar eficientemente os recursos de transmissão.

Alguns métodos para definição do tamanho do grant que podem ser utilizados em WDM-PONs são propostos em [Kramer, 2002]. Seja  $G_i$  o tamanho de um grant para uma ONU  $i$ ,  $R_i$  o tamanho do grant requisitado pela ONU e  $G_{max}$  o maior tamanho do grant, seguem algumas abordagens para definição do tamanho do grant:

- **Fixed** – O *grant* possui tamanho fixo e é sempre utilizado o seu tamanho máximo.  $G_i = G_{max}$ ;
- **Gated** – O tamanho concedido é sempre o mesmo requisitado pela ONU.  $G_i = R_i$ ;
- **Limited** – O *grant* concedido é sempre o mínimo entre o requisitado pela ONU e o seu valor máximo.  $G_i = \min(R_i, G_{max})$ .

Todos estes esquemas para definição do tamanho do grant simplesmente contabilizam as informações contidas nas mensagens de REPORT recebidas pelo OLT. Em WDM-PONs, estas mensagens podem chegar concorrentemente, logo, é prudente haver mecanismos que contabilizem todas as requisições a fim de prover melhores decisões na alocação da largura de onda.

O problema do agendamento dos grants em WDM-PONs pode ser formulado utilizando-se as notações de teorias de agendamento definidas em [Pinedo, 2002]. As teorias de agendamento referem-se ao agendamento de um conjunto de jobs com tempos de processamento específicos a serem executados por um conjunto de máquinas da maneira mais eficiente possível de acordo com um determinado critério de otimização. Desta maneira, pode-se definir cada uma das ONUs como um job, o tamanho do seu grant como o tempo de processamento e os canais utilizados para a transmissão como as máquinas. Nesta notação, um problema de agendamento é definido por uma tripla  $\alpha/\beta/\gamma$ , onde  $\alpha$  descreve o ambiente da máquina (ex.: única máquina, máquinas paralelas),  $\beta$  descreve as características e restrições de processamento e  $\gamma$  descreve o objetivo a ser minimizado [McGarry, 2006].

Para a formulação do problema do agendamento dos *grants* em WDM-PONs de acordo com a notação da teoria do agendamento, temos:

- $P$  denota o número de máquinas paralelas idênticas (canais) que definem o ambiente;

- $M_j$  refere-se às características ou restrições de processamento. Elegibilidade das máquinas.  $M_j$  é um conjunto de canais nos quais cada *job* (ONU)  $j$  pode ser transmitido;
- $C_j$  é o tempo em que a transmissão para a ONU  $j$  é encerrada;
- $w_j$  o peso prioritário da ONU  $j$ ;
- $C_{max}$  o tempo máximo de encerramento do agendamento produzido.

Através desta notação, define-se o problema do agendamento com o objetivo de minimizar a soma não ponderada do tempo de encerramento como  $P|\Sigma_j C_j$  [McGarry, 2006]. Similarmente, define-se o problema do agendamento com o objetivo de minimizar a soma ponderada do tempo de encerramento como  $P|\Sigma_j w_j C_j$  e o problema com o objetivo de minimizar o tempo máximo do agendamento como  $P|C_{max}$ .

Nos modelos descritos, as restrições  $M_j$  são necessárias pois cada ONU possui seu conjunto de comprimentos de ondas suportados. Caso todas as ONUs suportem transmissão em todos os canais, pode-se remover a restrição de elegibilidade para obter modelos  $P|\Sigma_j C_j$ ,  $P|\Sigma_j w_j C_j$  e  $P|C_{max}$ . O principal objetivo destes modelos é melhorar a utilização dos recursos e diminuir os atrasos de filas experimentados pelos frames em trânsito nas WDM-PONs.

Para verificar como estas questões de desempenho são relacionados com os objetivos das teorias de agendamento, é necessário primeiramente explorar em detalhe todos os componentes de atraso em um ciclo de agendamento. A duração do ciclo refere-se ao atraso GATE-to-GATE (GTG), tempo fim a fim da transmissão de um *grant* a uma ONU. Todos os atrasos presentes em um ciclo de agendamento são visualizados na Figura 13.

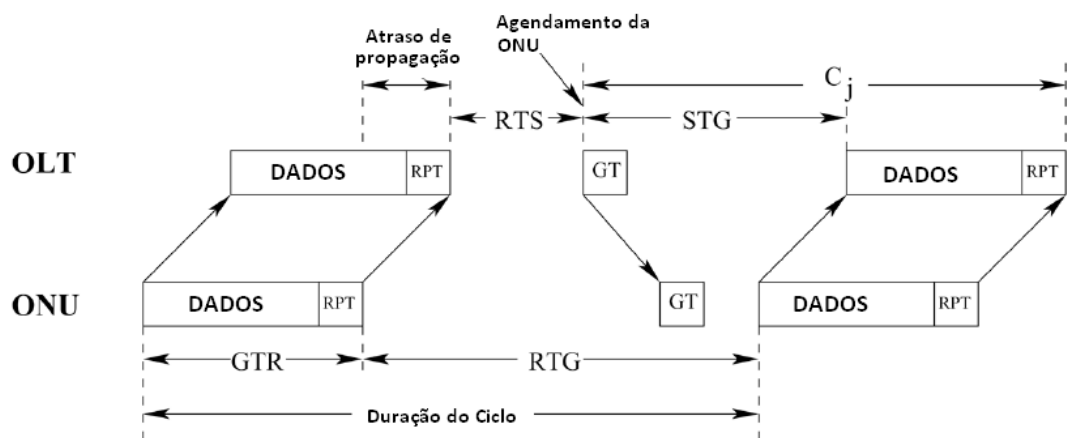


Figura 13 – Ilustração do ciclo de agendamento [McGarry, 2008]

O GTR representa o atraso GATE-to-REPORT. Uma vez que as ONUs incluem o REPORT no final de cada janela de transmissão, o GTR é igual ao tempo de transmissão do *grant* e o RTG representa o atraso REPORT-to-GATE que refere-se ao atraso de propagação entre ONU e OLT. Através do GTR e do RTG, define-se a duração do ciclo GTG por  $GTG=GTR+RTG$ .

O GTR é completamente dependente do tamanho do *grant*, enquanto o RTG é relacionado à qualidade do agendamento. O STG representa o atraso SCHEDULE-to-GATE que é o tempo em que o OLT agenda o próximo *grant* de uma ONU e o tempo de início do *grant*. O STG inclui o atraso de propagação da OLT para a ONU, o tempo de transmissão da mensagem GATE e o atraso de propagação da ONU para o OLT.

O STG, juntamente com o tempo do *grant* representa o tempo de encerramento da transmissão desde o momento em que foi agendada, ou seja,  $C_j=STG+GTR$ . Uma vez que o tempo do *grant* (ou tamanho) não é determinado pelo algoritmo de agendamento, este somente trabalha na redução da porção variável do tempo de encerramento, isto é, o STG. O RTS é o atraso REPORT-to-SCHEDULE que representa o OLT recebendo uma mensagem de REPORT de uma ONU até o momento do seu agendamento. Desta maneira, o atraso RTG é composto pelos atrasos RTS e STG, isto é.  $RTG=RTS+STG$ .

O atraso RTS depende do *framework* de agendamento utilizado bem como a duração geral do agendamento. A duração geral do agendamento é  $C_{\max}$  ( $C_{\max}=\max_j C_j$ ) para *frameworks offline*. Em algoritmos *offline*, minimizar  $C_{\max}$  irá ajudar a minimizar o RTS [McGarry, 2006].

Um frame Ethernet que chega à ONU pouco antes da mensagem de REPORT ser preparada para transmissão é contabilizado naquela mensagem e é transmitido no final do próximo *grant*. Entretanto, um frame Ethernet que chega logo após a geração da mensagem de REPORT não será contabilizado para a próxima transmissão e aguardará o próximo ciclo de agendamento.

Em [McGarry, 2008] é apresentada uma abordagem em camadas para o agendamento dos *grants*. Na Figura 14 a primeira camada é destinada aos *frameworks* de agendamento enquanto a segunda consiste nas políticas de agendamento. Os *frameworks* de agendamento determinam quando o OLT toma as decisões de agendamento enquanto as políticas de agendamento são os métodos pelos quais o OLT produzirá o agendamento. O OLT pode produzir um agendamento com informação parcial sobre as requisições das ONUs a serem agendadas ou até mesmo receber todas as requisições. Uma vez que o OLT possui um



conjunto de requisições a serem agendadas, o OLT utiliza uma política de agendamento para realizar o agendamento.

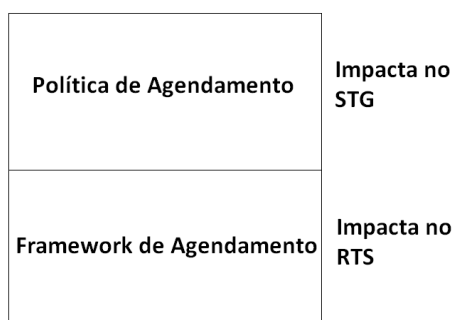


Figura 14 – Abordagem em camadas para o agendamento de *grants* [McGarry, 2008]

O *framework* de agendamento interfere no atraso RTS por determinar em quanto tempo após receber uma mensagem de REPORT o próximo *grant* será agendado. Em contrapartida, a política de agendamento impacta diretamente no atraso STG por determinar quando este *grant* é transmitido no canal. Em seguida serão apresentadas as principais questões que envolvem as abordagens dos *frameworks* de agendamento *offline*, *online* e *online just-in-time* (JIT), bem como as principais políticas de agendamento utilizadas.

### 3.3.1 Frameworks de Agendamento

Conforme mencionado anteriormente, *frameworks* de agendamento determinam em que momento o OLT produz um agendamento. Se o OLT produz um agendamento logo em seguida o recebimento de uma mensagem de REPORT originada por uma ONU, estamos nos referindo a um *framework online* de agendamento. Entretanto, se o OLT aguarda todas as mensagens de REPORT de todas as ONUs antes de realizar as decisões de agendamento, estamos nos referindo ao *framework offline* de agendamento. Na Figura 15, o *framework* de agendamento pode ser visto como uma linha contínua entre os dois extremos de agendamento *online* e *offline* [McGarry, 2008].

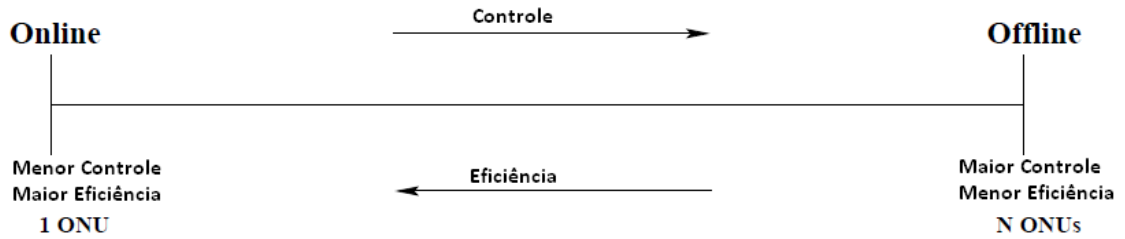


Figura 15 – Extremos entre os *frameworks* de agendamento.

Em um dos extremos, no agendamento *online*, o OLT apenas considera uma única requisição na decisão de agendamento. Apesar de prover maior eficiência, esta abordagem oferece menor controle por não adquirir conhecimento global de todas as requisições das demais ONUs. Já no outro extremo, no agendamento *offline*, o OLT considera todas as mensagens de REPORT de todas as ONUs, possibilitando melhores decisões no agendamento, por possuir uma visão global das requisições, apesar de perder em eficiência por aguardar todas as requisições. Qualquer *framework* entre *online* e *offline*, o que representaria um esquema híbrido, é de alguma forma um *framework online* de agendamento pois nem todas as mensagens de REPORT de todas as ONUs são recebidas [McGarry, 2008].

### 3.3.1.1 Offline

Em um *framework offline*, as ONUs são agendadas para transmissão uma vez que a OLT tenha recebido mensagens de REPORT de todas as ONUs. Desta maneira, as decisões de agendamento são feitas com total conhecimento de todos os *jobs* a serem agendados, incluindo seus tempos de processamento em um determinado ciclo. O OLT leva em consideração no agendamento, e na definição do tamanho do *grant*, todas as requisições de largura de banda de todas as ONUs.

Esta abordagem exige que o algoritmo de agendamento seja executado após o OLT receber o final da última janela de transmissão das ONUs. Em função disto, todos os *grants* são agendados após o  $C_{max}$ . O atraso RTS para a última ONU será desprezível, entretanto, o RTS pode não ser desprezível para as demais ONUs. Este RTS irá introduzir atrasos de enfileiramento nas ONUs em função do ciclo (GTG) para uma ONU.

Na Figura 16, o pior caso de atraso RTS é o da ONU 2. Esta ONU é a primeira ONU a concluir sua janela de transmissão concedida e envia sua mensagem de REPORT ao OLT. O comprimento de onda 1 estava disponível logo depois da transmissão da ONU 1 e poderia ter acomodado a próxima requisição da ONU 2 em um tempo de segurança (*guard time*) logo em seguida. Uma vez que o OLT aguarda por todas as mensagens de REPORT, o agendamento do *grant* da ONU 2 é atrasado e precisa aguardar até o recebimento da mensagem de REPORT da ONU 3, que neste caso é a última requisição a ser recebida [McGarry, 2008].

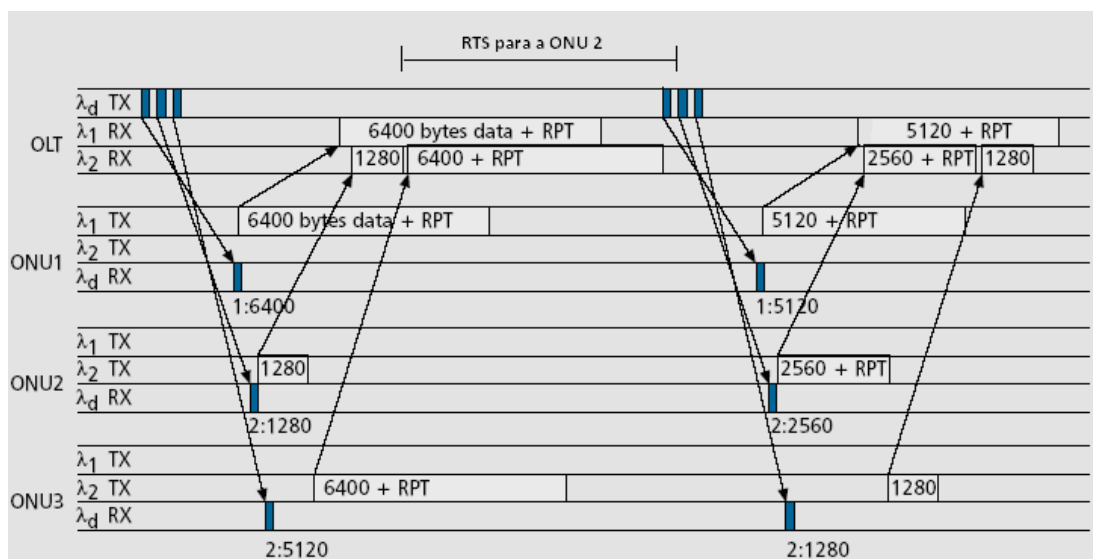


Figura 16 – Agendamento *Offline*

### 3.3.1.2 Online

No *framework online*, o agendamento do *grant* a uma determinada ONU ocorre logo após o recebimento da sua mensagem de REPORT pelo OLT. Em outras palavras, o OLT faz suas decisões de agendamento baseada nas requisições individuais e sem conhecimento das demais ONUs. Uma política básica utilizada pelo *framework online* é agendar a transmissão *upstream* no próximo comprimento de onda disponível, política denominada *Next Available Supported Channel* (NASC).

A Figura 17 apresenta o agendamento *online* utilizando a política NASC. Percebe-se que a transmissão *upstream* de 2560 bytes da ONU 2 (segundo grant desta ONU) é agendado no próximo canal disponível, neste caso, no comprimento de onda 1. Observa-se também que o atraso RTS verificado no agendamento *offline* não existe nesta abordagem de agendamento uma vez que a ONU é agendada logo em seguida ao recebimento de sua mensagem de REPORT pelo OLT. Isto significa que o atraso RTG simplesmente reduz o atraso STG, e conseqüentemente o  $C_j$ , tempo de encerramento da transmissão da ONU [McGarry, 2008].

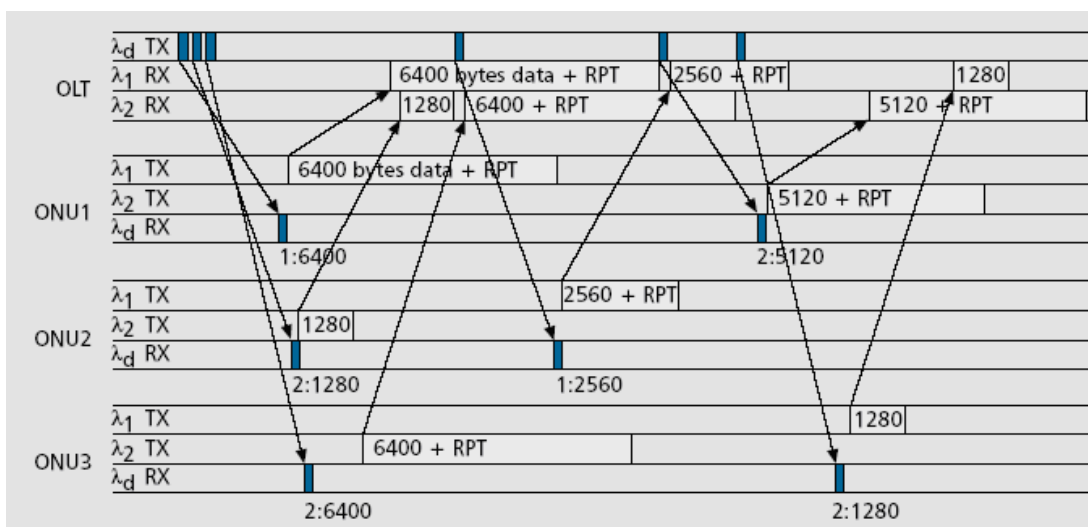


Figura 17 – Agendamento *Online* utilizando a política NASC [McGarry, 2008].

Em [McGarry, 2008] foi proposto o agendamento online just-in-time (JIT), ou seja, pouco antes do NASC tornar-se disponível, onde o agendamento dos grants é realizado até o último instante em que a mensagem GATE pode ser transmitida sem adicionar qualquer atraso adicional desnecessário na fila. Durante este período, as ONUs podem comunicar suas mensagens de REPORT ao OLT, que por sua vez agrega um conjunto de requisições a serem agendadas através de uma política offline, tais como LFJ, SPT, entre outras, a fim de minimizar o  $\sum_j C_j$ .

O principal objetivo do framework online JIT é propor uma abordagem híbrida no agendamento de grants ao permitir tempo suficiente para a transmissão de uma mensagem GATE para uma ONU (ou seja, atraso de propagação + tempo de transmissão de mensagem GATE) e começar a receber os dados da ONU (ou seja, atraso de propagação) no NASC. Considerando Tsched o último momento que se pode agendar uma ONU, Tfree o tempo de

disponibilidade do NASC, RTT o tempo de ida e volta entre OLT e ONU, e TGATE ser o tempo de transmissão de uma mensagem GATE. Para o agendamento just-in-time é preciso agendar uma ONU no momento  $T_{\text{sched}} = T_{\text{free}} - \text{RTT} + \text{TGATE}$ .

### 3.3.2 Políticas de Agendamento

O OLT utiliza políticas de agendamento para definir como um conjunto de grants serão agendados uma vez selecionados a partir de um framework de agendamento. Neste contexto destacam-se a política NASC, os modelos de máquinas paralelas e os modelos de máquinas independentes [Pinedo, 2002].

A política NASC é uma política simples de agendamento que considera uma ONU de cada vez e agenda sua transmissão upstream no próximo canal de comprimento de onda suportado por esta ONU. A política NASC é uma variação de um algoritmo proposto por [Graham, 1966] há mais de 40 anos chamado de algoritmo de lista para máquinas paralelas idênticas. Este algoritmo agenda jobs, um por um, e os atribui para a próxima máquina disponível.

Utilizando o modelo de máquinas paralelas, algumas regras de distribuição podem prover boas políticas de agendamento. Uma regra de distribuição é um método definido para ordenar os jobs a serem executados por primeiro em máquinas disponíveis. [Pinedo, 2002]. Abaixo seguem alguns exemplos de políticas de agendamento que podem ser utilizadas:

- ***Least Flexible Job (LFJ)*** – Seleciona a ONU com menor quantidade de canais suportados;
- ***Shortest Processing Time (SPT)*** - Seleciona a ONU com menor tempo de processamento;
- ***Largest Processing Time (LPT)*** - Seleciona a ONU com maior tempo de processamento;
- ***Longest Queue First (LQF)*** – Seleciona a ONU com maior fila;
- ***Largest Number of Frames (LNF)*** - Seleciona a ONU com maior quantidade de *frames* enfileirados;

- ***Earliest Arriving Frame (EAF)*** - Seleciona a ONU que possui no topo de sua fila o frame *Ethernet* com o tempo de chegada mais recente;
- ***Earliest Average Arrival (EAA)*** - Seleciona a ONU que possui a média do tempo de chegada mais recente dos seus *frames*.

Outra possível abordagem para modelagem do problema de agendamento de grants em WDM-PONs é descartar o modelo de ambientes com máquinas paralelas reconhecendo que  $P \parallel M_j \parallel \sum_j C_j$  pode ser visto como um caso especial de  $R \parallel \sum_j C_j$ , onde  $R$  refere-se a um ambiente de máquinas independentes onde cada máquina executa um job em uma velocidade diferente. [McGarry, 2006] aponta a política Weighted Bipartite Matching (WBM) como uma boa formulação para este modelo.

### 3.4 ALOCAÇÃO DA LARGURA DE BANDA

A alocação de largura de banda é um processo realizado pelo OLT e que tem por objetivo gerenciar as transmissões realizadas com as ONUs uma vez que os canais de comunicação são compartilhados. A alocação deve ser eficiente e justa entre os tráfegos upstream e downstream, aproveitando ao máximo a utilização dos canais.

Em [Kramer et al., 2001] os autores propuseram um esquema simples de alocação de largura de banda para arquiteturas TDM-PONs que estabelece timeslots fixos para a transmissão. Porém, em algumas situações, o timeslot atribuído pode ser insuficiente para atender as requisições de largura de banda das ONUs, fato que contribui para o aumento do atraso dos frames que aguardam vários timeslots até serem transmitidos. Isto ocorre principalmente em função das características do tráfego em rajadas. Em outras situações, alguns timeslots podem ser subutilizados, mesmo sob altas cargas. Consequentemente, este esquema implica em grande desperdício de largura de banda.

Em função disto, foi necessário adequar os algoritmos de alocação de largura de banda para que realizem um agendamento dinâmico e mais eficiente. Assim, foram propostos os algoritmos DBA que utilizam multiplexação estatística, como por exemplo o Interleaved Polling with Adaptive Cycle Time (IPACT) [Kramer, 2002]. Este tipo de algoritmo reduz o

tamanho do timeslot quando não há dados a transmitir, disponibilizando o restante para as demais ONUs e otimizando a largura de banda do canal. Entre as categorias, encontram-se abordagens de alocação de banda fixa (FBA), alocação de largura de banda baseada no algoritmo IPACT e alocação de banda baseada em predição (PBA).

Em [Kwong et al., 2004 ] uma versão para múltiplos comprimentos de onda do IPACT chamada WDM IPACT-ST foi proposta, onde ST refere-se a uma única tabela de polling (single table). Este algoritmo mantém conhecimento do tempo de disponibilidade de todos os comprimentos de onda upstream. Uma vez recebido uma mensagem de REPORT de uma ONU, o OLT agenda a próxima transmissão das ONUs no próximo comprimento de onda disponível. Este algoritmo assume que cada ONU suporta todos os comprimentos de onda. Este esquema é semelhante ao WDM IPACT proposto em [McGarry, 2004]. Em [Clark et al., 2006] foi proposto o SIPACT, outra extensão WDM do IPACT semelhante ao WDM IPACT.

Para ilustrar o funcionamento do WDM IPACT, a Figura 18 apresenta um exemplo de WDM-PON com 2 canais upstream e 2 canais downstream [Kwong et al, 2004]. Duas filas físicas e independentes estão localizadas dentro de cada ONU armazenando os pacotes de entrada provenientes dos usuários. Cada fila é atribuída a um laser fixo operando em diferentes comprimentos de onda. Quando um pacote chega à ONU é encaminhado para uma das filas de acordo com algum mecanismo de distribuição. No entanto, cada fila é agendada para transmissão de forma independente pelo OLT, assim, a fila 1 de todas as ONUs serão agendadas por vez para a transmissão no primeiro canal upstream enquanto a fila 2 irá compartilhar a largura de banda do segundo canal upstream. Duas tabelas de polling são utilizadas no OLT para registrar as solicitações feitas pelas ONUs. Nas tabelas de polling do OLT, informações incluindo a identidade (NID), o RTT e os bytes solicitados (V) estão presentes. O tempo de início de transmissão e a duração de cada janela de transmissão de cada ONU são calculados e atribuídos pelo OLT de acordo com as informações repassadas pela ONU durante a transmissão anterior.

Neste exemplo, assume-se que no tempo  $t_0$  o OLT conhece exatamente quantos bytes estão aguardando na fila 1 e na fila 2 de cada ONU. O OLT recebe as requisições originadas pelas ONUs no canal upstream 1 e na tabela de polling 1 e as requisições upstream do canal 2 na tabela 2. Os RTTs de cada ONU também são armazenados nas tabelas de polling. No tempo  $t_0$ , o OLT envia uma mensagem GATE para a ONU 1 permitindo a transmissão de 6000 bytes dos pacotes armazenados na fila 1 no canal upstream 1, e uma mensagem GATE para a ONU 2 permitindo a transmissão de 3000 bytes dos pacotes

armazenados na fila 2 no canal 2. Mensagens GATE são enviadas em broadcast para todas as ONUs e, baseado no ID das mensagens, são recebidos pelas ONUs 1 e 2 de maneira apropriada. Este processo é apresentado na Figura 18(a).

Uma vez recebida a mensagem GATE originada pelo OLT, a ONU 1 inicia o envio dos seus dados no canal upstream 1 e a ONU 2 no canal upstream 2 limitados pelos tamanhos especificados na própria mensagem. Ao final da janela de transmissão da ONU 2, uma mensagem REPORT é gerada pela ONU 2 a fim de informar o OLT quantos bytes estão aguardando para a próxima transmissão no canal upstream 2. Ao final da janela de transmissão da ONU 1, uma mensagem REPORT é gerada pela ONU 1, sendo necessário atualizar a tabela 1 de polling. A Figura 18(b) ilustra as ONUs 1 e 2 transmitindo seus pacotes nos canais correspondentes.

Antes de receber resposta da ONU 1 no canal upstream 1 (ou da ONU 2 no canal upstream 2), o OLT tem conhecimento de quando chegarão os últimos bits de ambas as transmissões. Baseado nas informações gravadas nas tabelas de polling, o ultimo tempo de chegada de bits das ONUs pode ser obtido através de  $t=t_0+ RTT + \text{janela de transmissão}$ , onde  $t_0$  é o tempo em que a mensagem GATE é enviada às ONUs. O RTT inclui o tempo de propagação, o tempo de processamento da mensagem GATE, tempo de geração da mensagem REPORT e o preâmbulo para o OLT alinhar os dados recebidos, ou seja, é exatamente o intervalo entre o envio de uma mensagem GATE para uma ONU e a recepção dos dados provenientes da mesma.

A janela de transmissão refere-se à quantidade de tempo necessário para transmitir os dados requisitados da ONU ao OLT. Com o conhecimento do término das transmissões das ONUs 1 e 2, o OLT pode agendar uma mensagem GATE para a ONU 3 permitindo sua transmissão upstream no canal 2, sendo que o primeiro bit da ONU 3 chegará logo em seguida o último bit da ONU 2, mais  $5\mu\text{s}$  de tempo de segurança. O mesmo processo é utilizado para agendamento da mensagem GATE para a ONU 2, permitindo transmissão dos pacotes de sua fila 1 no canal 1 upstream.

Em  $t_1$ , ao final da transmissão da ONU 2, existe uma nova mensagem de REPORT contendo informações de quantos bytes estão aguardando na fila 2 da ONU 2. O OLT utiliza esta informação para atualizar a tabela 2 (Figura 18(c)). Ao final da transmissão da ONU 1, o OLT irá utilizar a mensagem de REPORT da ONU 1 para atualizar a tabela 1.

O OLT utiliza a informação na tabela de polling para agendar todas as ONUs a transmitir os pacotes de sua fila 1 no canal upstream 1 e pacotes de sua fila 2 no canal upstream 2 (Figura 18(d)).



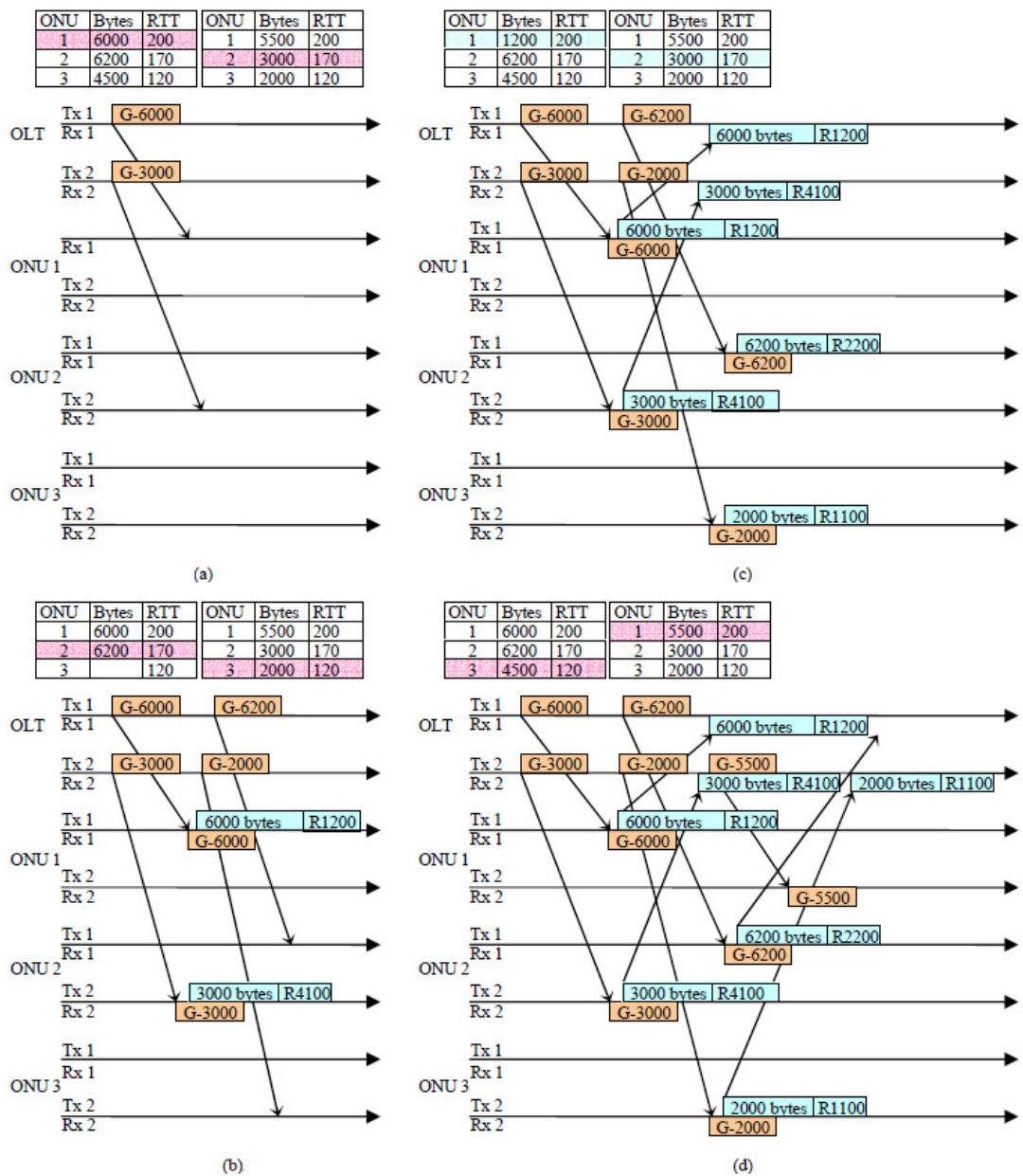


Figura 18 – Algoritmo WDM IPACT [Kwong et al, 2004].

Fica claro que, com a descrição acima, um sistema WDM IPACT com 2 canais pode ser configurado sem processos complexos de sincronização e negociação. Uma vez que todo o agendamento e alocação de largura de banda são desempenhados pelo OLT, mudanças nas configurações das ONUs ou desconexões por mal funcionamento das ONUs terão impacto mínimo no sistema.

## 4 PROPOSTA DO ALGORITMO HGS-PQ

### 4.1 INTRODUÇÃO

Um dos principais desafios de pesquisa em WDM-PONs está relacionado ao desenvolvimento de algoritmos DBA que devem ser capazes de gerenciar os recursos compartilhados de uma arquitetura e de realizar o agendamento justo e eficiente dos tráfegos *upstream* e *downstream*, garantindo bom desempenho na utilização dos canais e baixos atrasos na rede.

A proposta de um algoritmo híbrido de agendamento de *grants* baseado em priorização de filas (*Hybrid Grant Scheduler based on Priority Queuing* - HGS-PQ) para WDM-PONs busca oferecer controle e eficiência ao OLT fundamentado-se nas teorias de agendamento. A proposta híbrida explora a abordagem do *framework online just-in-time* para realizar o agendamento dos *grants* com eficiência, sem incrementar atrasos desnecessários, ao mesmo tempo que fornece espaço para controle e otimização através da utilização de regras de distribuição e políticas para agendamento. O algoritmo HGS-PQ leva em consideração a utilização dos recursos presentes no OLT (transmissores e receptores) além da disponibilidade dos canais para determinar o momento do agendamento dos tráfegos *upstream* e priorizar as ONUs de acordo com uma determinada política de agendamento. O algoritmo proposto busca oferecer controle ao OLT, baixos atrasos e bom desempenho na utilização dos recursos.

Este capítulo apresenta a proposta do algoritmo HGS-PQ e suas principais características e abordagens. Inicialmente são apresentados os trabalhos relacionados e as principais características da arquitetura SUCCESS-HPON, arquitetura WDM-PON a ser adotada como cenário para implantação do algoritmo. Em seguida, são descritos os principais aspectos do algoritmo HGS-PQ, apresentando as abordagens utilizadas para o agendamento dos tráfegos *upstream* e *downstream* e para o gerenciamento dos recursos da rede. Encerra-se o capítulo apresentando uma síntese das características do algoritmo HGS-PQ e dos demais algoritmos DBA propostos na literatura para a arquitetura SUCCESS-HPON.

## 4.2 TRABALHOS RELACIONADOS

Os trabalhos propostos para WDM-PONs estão fortemente relacionados a aspectos referentes às características dos equipamentos para Optical Network Units (ONUs) e Optical Line Terminal (OLT) e às arquiteturas, que juntamente com seus protocolos e algoritmos de agendamento, determinam o funcionamento destas redes. Em [Banerjee et al. 2005] é feita uma completa abordagem destes vários aspectos. O artigo descreve as diversas opções tecnológicas que podem ser utilizadas nos equipamentos, faz um resumo das principais arquiteturas WDM-PONs já propostas na literatura, seus protocolos correspondentes e exemplifica os serviços que podem ser utilizados nestas redes.

Em [An et al. 2004], os autores propõem uma arquitetura híbrida WDM/TDM de rede óptica de acesso chamada Stanford University aCESS ou SUCCESS-HPON. Neste artigo, os autores preocupam-se em enfatizar o processo de migração do modelo tradicional TDM-PON para WDM-PON viabilizado pela arquitetura, além de descrever sua topologia, esquemas de proteção, restauração e características dos equipamentos. São gerados resultados através de simulação do protocolo MAC que comprovaram a comunicação entre OLT e ONUs sobre múltiplos comprimentos de onda com um pequeno número de transmissores e receptores.

O primeiro *testbed* para a arquitetura proposta pela Universidade de Stanford é descrito em [An et al. 2005], juntamente com resultados experimentais obtidos. Dentre os resultados, os autores comprovam a viabilidade da transmissão bidirecional no mesmo comprimento de onda e da modulação na ONU dos dados *upstream* via ondas contínuas (*Continuous Wave – CW*) originadas pelo OLT, eliminando a necessidade de fonte óptica nas ONUs. Os autores prevêem o desenvolvimento de um segundo *testbed* que implementará o protocolo MAC na arquitetura, bem como o algoritmo de agendamento a ser utilizado.

Já em [Kim et al. 2004], os autores abordaram o problema do gerenciamento de recursos e do agendamento dos pacotes sobre a arquitetura SUCCESS. Neste artigo, é proposto um algoritmo de agendamento, baseado em seu antecessor que provê otimização através de filas virtuais de prioridade (*Virtual Output Queues - VOQs*), no agendamento de mais de um *frame* através de períodos pré-definidos. A arquitetura proposta apresenta características únicas que diretamente influenciam no desenvolvimento do algoritmo de agendamento, como por exemplo, o fato da presença de transmissores e receptores ajustáveis

no OLT e a utilização de ondas contínuas (*Coninuous Waves – CW*) para transmissão dos tráfegos. No final do artigo os autores demonstram através de simulações que o algoritmo provê maior vazão a altas taxas e maior justeza entre as transmissões *upstream* e *downstream* quando comparado com o algoritmo de agendamento anterior.

Em [Kim et al. 2005] os autores demonstraram os resultados da análise de desempenho feita para dois novos algoritmos que tem por finalidade realizar o agendamento justo e eficiente dos pacotes sobre a arquitetura SUCCESS-HPON. Foram desenvolvidos e descritos os algoritmos de agendamento *Batching Earliest Departure First* (BEDF) e *Sequential Scheduling with Schedule-time Framing* (S<sup>3</sup>F) que, após diversas simulações com as mais variadas configurações de transmissores e receptores, foram comparados com o algoritmo de agendamento sequencial original e demonstraram que, além de garantir justeza entre os tráfegos *upstream* e *downstream*, melhoram os desempenhos de vazão e atraso.

Em [McGarry, 2006], o problema do agendamento de *grants* foi abordado em WDM-PONs através do modelo de máquinas paralelas utilizando as políticas LFJ e SPT como política de regras compostas. Os autores em [McGarry, 2008] apresentam um método eficiente de agendamento para EPONs multicanais baseado no *framework* de agendamento *online JIT*. Neste artigo, assume-se que os canais são idênticos e que o modelo de máquinas paralelas é utilizado para resolver o problema do agendamento.

#### 4.3 ARQUITETURA ADOTADA

A arquitetura de rede óptica de acesso denominada Stanford University aCESS – Hybrid PON ou SUCCESS-HPON, proposta pela Universidade de Stanford, é uma das várias arquiteturas WDM-PONs propostas na literatura. É considerada uma arquitetura híbrida por suportar árvores TDM-PONs e WDM-PONs e que possui componentes ajustáveis e centralizados responsáveis tanto pelas transmissões *downstream* quanto *upstream*.

O ponto de partida para o desenvolvimento desta arquitetura foi levar em consideração o processo de evolução dos padrões atuais de TDM-PONs para uma tecnologia de próxima geração de forma transparente e eficiente. Em função disto, alguns fatores definidos como pré-requisitos para o seu desenvolvimento fundamentaram a escolha desta arquitetura como cenário de testes para algoritmo proposto. São eles:

- Compatibilidade: Garantir coexistência com a geração atual de TDM-PONs e a próxima geração de WDM-PONs na mesma rede;
- Fácil Upgrade: Prover migração transparente das TDM-PONs para WDM-PONs;
- Escalabilidade e Capacidade de Proteção/Restauração: Suportar assinantes residenciais e corporativos na mesma rede.

### 4.3.1 Topologia

Sua topologia básica consiste em um anel coletor de única fibra com estrelas anexadas ao mesmo, sendo que o centro das estrelas é representado pelos *remote nodes* (RNs), que separam os comprimentos de onda dedicados para cada um dos usuários. A arquitetura SUCCESS-HPON em sua forma geral, incluindo suas árvores de TDM-PONs e WDM-PONs, pode ser observada na Figura 19.

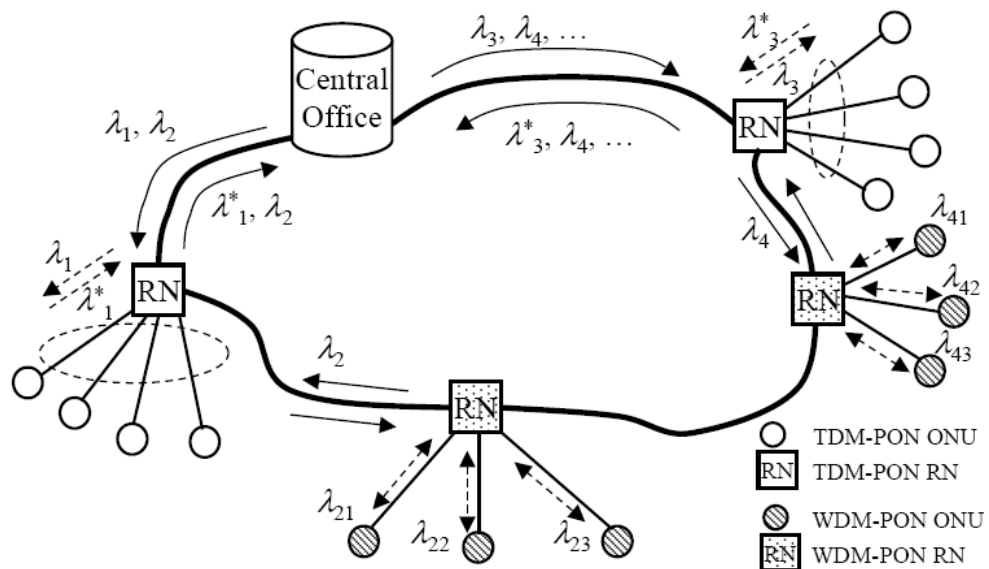


Figura 19 – Arquitetura SUCCESS-HPON [An et al., 2004]

### 4.3.2 Características Físicas dos Componentes

A arquitetura SUCCESS-HPON possui conexões WDM ponto-a-ponto entre o CO e as ONUs, que disponibiliza os serviços aos usuários, e cada um dos RNs. Os usuários atrelados aos RNs do lado leste se comunicam com os *transceivers* do lado leste, acontecendo o mesmo com os usuários atrelados aos RNs do lado oeste do anel. Por haverem dois tipos de estrelas na rede (TDM-PONs e WDM-PONs), a arquitetura possui dois tipos de RNs. O RN TDM-PON possui um par de *splitters* CWDM por PON para adicionar e retirar comprimentos de onda, tanto para transmissões *upstream* como *downstream*, enquanto que o RN WDM-PON possui somente um *splitter* CWDM. Os RNs possuem um papel de fundamental importância na ocorrência de falhas, sendo responsáveis pela mudança da orientação na ocorrência das mesmas. Para isto, são compostos por um equipamento MUX/DEMUX DWDM, como por exemplo um AWG [An et al. 2005a].

A Figura 20(a) demonstra o diagrama do bloco lógico para a parte WDM-PON do OLT SUCCESS-HPON. A utilização de componentes ajustáveis minimiza a quantidade de *transceivers* e do custo do sistema por serem compartilhados entre os usuários [An et al. 2005a]. Quanto mais usuários ingressarem na rede, mais transmissores e receptores ajustáveis são adicionados no OLT. Os sinais ópticos do tráfego *upstream* são separados através da presença dos circuladores. O *Scheduler* controla a operação de todos os recursos ajustáveis, no OLT.

As ONUs WDM, responsáveis por converter o sinal óptico do OLT para as portas padrões dos equipamentos do usuário final, possuem dentro uma grade DWDM de comprimentos de onda, canais dedicados para comunicação com o OLT. Considerando que a inserção de perda de um AWG seja aproximadamente 6 dB independente do número de portas [An et al. 2005], este equipamento pode ser utilizado para melhor aproveitamento da potência, quando comparado com um *splitter* passivo.

A Figura 20(b) apresenta o diagrama do bloco lógico da parte WDM-PON da ONU SUCCESS-HPON. A ONU não possui fonte óptica e, ao invés disto, utiliza um modulador óptico para modular as rajadas de CW recebidas do OLT para sua transmissão *upstream*, realizando assim uma comunicação física *half-duplex*. A ONU também não necessita de um receptor ajustável. O receptor apenas necessita possuir largura de faixa suficiente para receber qualquer canal DWDM utilizado na rede. O bloco MAC na ONU

controla o chaveamento entre transmissões *upstream* e *downstream* e também coordena, juntamente com o *Scheduler* do OLT, o *polling* e os mecanismos de alocação de banda.

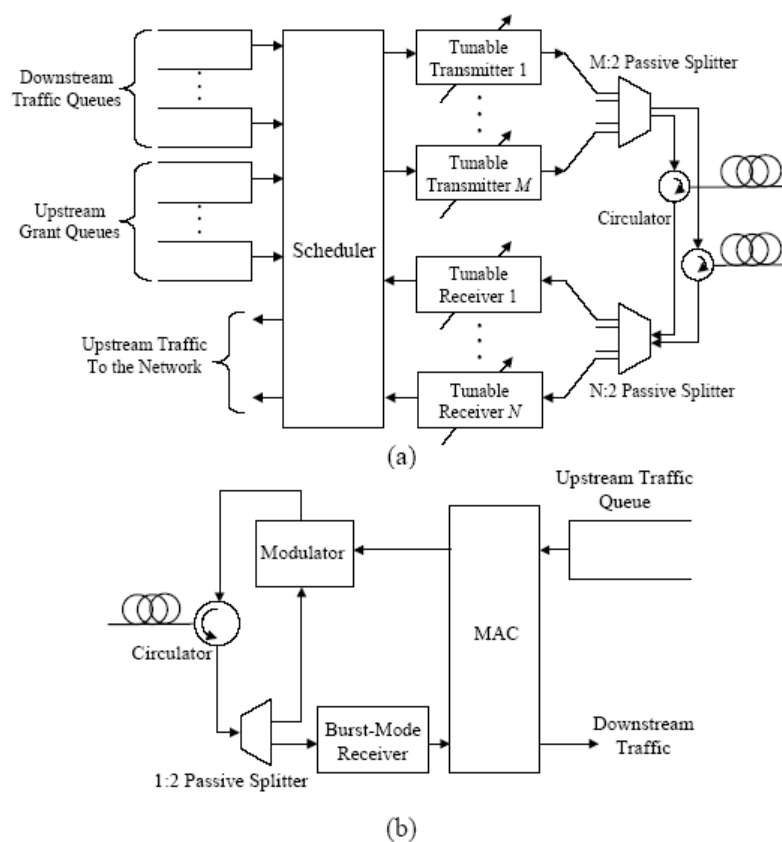


Figura 20 – Blocos Lógicos do OLT (a) e da ONU (b) WDM [An et al., 2004]

### 4.3.3 Estratégia para Migração das Redes TDM-PONs

A Figura 21 demonstra um cenário de migração de uma rede de acesso óptica para a arquitetura SUCCESS-HPON. A Figura 21(a) apresenta três árvores TDM-PONs conectadas ao mesmo CO. Cada uma possui sua própria infra-estrutura e OLT localizada no CO. A Figura 21 (b) mostra o primeiro passo de migração da infra-estrutura existente. Os *splitters* existentes são substituídos pelos RNs que consistem de *splitters* passivos e filtros ADD/DROP para introduzir o CWDM. As fibras de distribuição são substituídas por um anel de única fibra que varre todos os RN servidos pelo CO. Do ponto de vista das ONUs, este estágio é transparente.

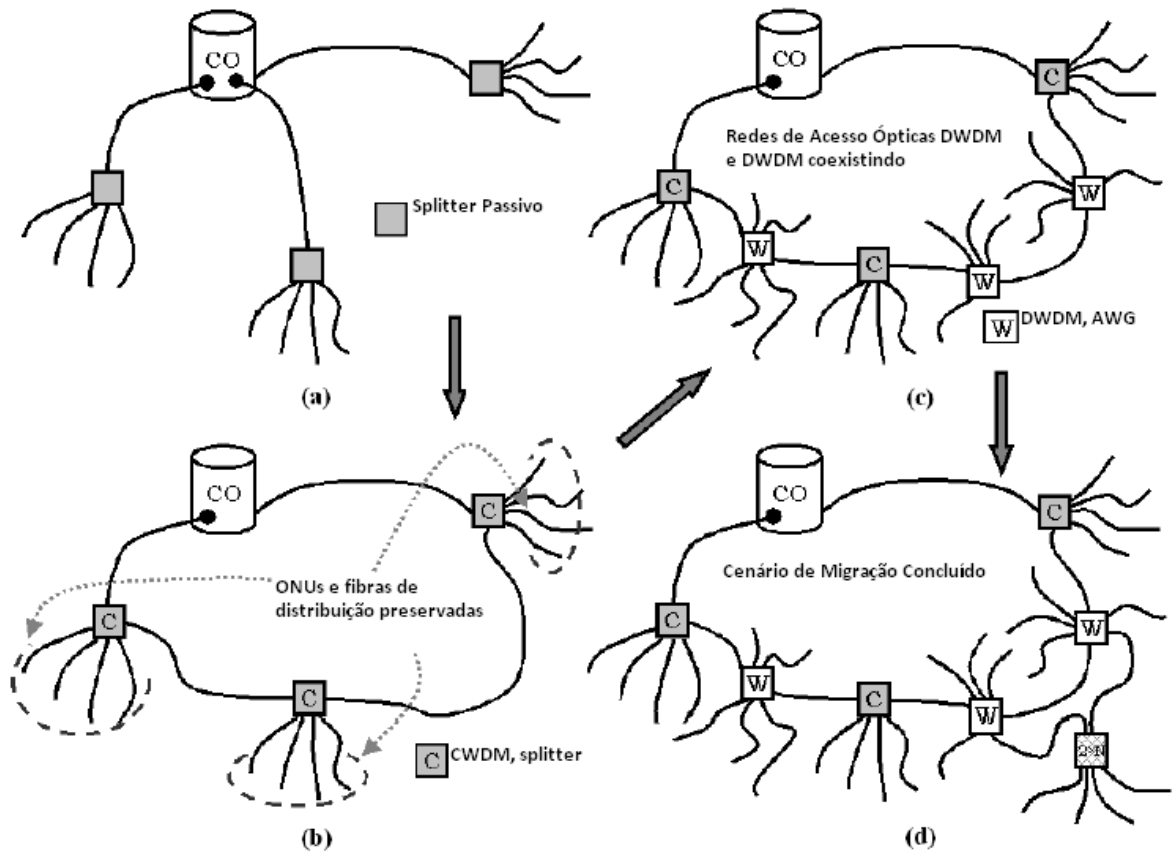


Figura 21 – Cenário de migração para SUCCESS-HPON [An et al., 2004]

A Figura 21(c) descreve a segunda fase de migração. Conforme mais usuários requisitem maior largura de banda em função de suas aplicações, RN que contém AWG e MUX/DEMUX DWDM são inseridos na rede. Se as funcionalidades de proteção e redundância estiverem implementadas nos RN existentes através de *switches* semi-passivos, inserir um novo RN não prejudicará a operação da rede. A Figura 21(d) apresenta um possível cenário de extensão da rede. Uma vez que existe um comprimento de onda dedicado na saída do AWG, é possível utilizar o anel coletor como *backhaul* para a PON com topologia em árvore. As duas fibras de distribuição da PON pode conectar diferentes RN para formar um esquema de proteção.



#### 4.3.4 Protocolo MAC e Algoritmos DBA

O protocolo MAC utilizado pela SUCCESS-HPON utiliza o mecanismo de *polling* para checar a quantidade de tráfego *upstream* armazenado nas ONUs e o OLT envia os *grants*, no formato de rajadas CW, para permitir que as ONUs transmitam o que foi previamente requisitado.

Este protocolo emprega a sinalização *in band*, por não utilizar nenhum canal adicional para esta finalidade, e utiliza *frames* com os campos REPORT e GRANT definidos para o mecanismo de *polling* e envio de *grants*, respectivamente. Como pode ser observado na Figura 22, existem dois tipos de *frames* para transmissão *downstream*, uma para o envio de dados e outro para *grants*. O campo *Frame Type* no cabeçalho do frame *downstream* indica para qual dos dois propósitos deve ser utilizado.

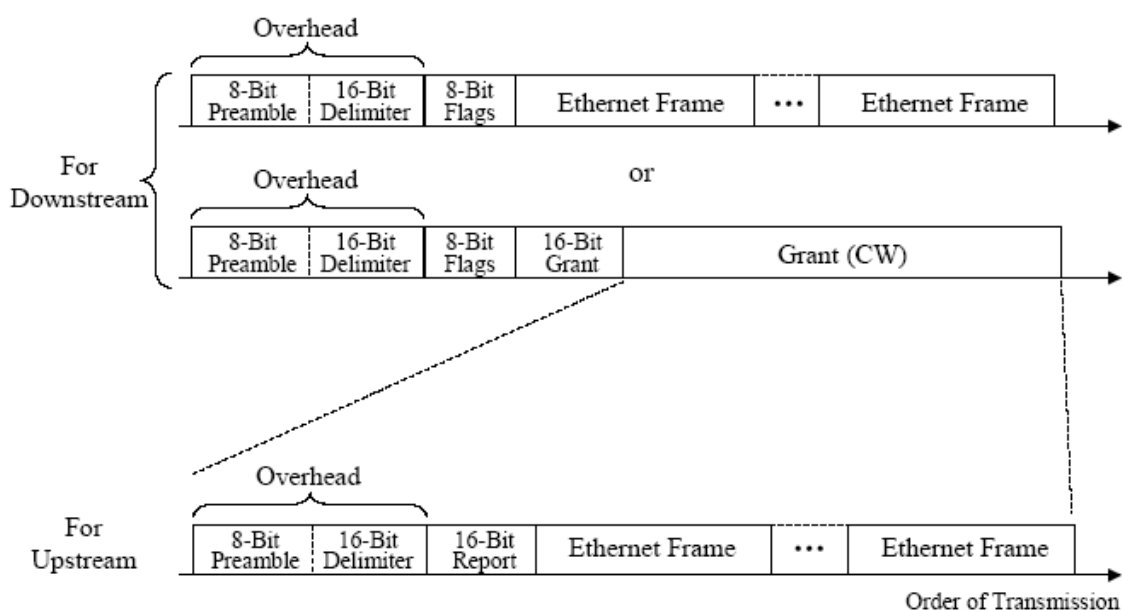


Figura 22 – Formato dos *frames* do protocolo MAC [Kim, 2005].

Dois parâmetros de controle são de fundamental importância para o gerenciamento do mecanismo de *polling*. O parâmetro ONU\_TIMEOUT contém o tempo máximo pelo qual o OLT deve enviar um *grant* para uma determinada ONU e receber o *frame upstream* com o campo REPORT solicitando nova transmissão. Caso este tempo expire, o que indica perda do *frame* ou ausência de tráfego *upstream*, um novo *polling* é iniciado. Já o

parâmetro MAX\_GRANT contém o tamanho máximo estabelecido para o *grant* a fim de que a quantidade de *bits* do tráfego *upstream* não seja excedido.

O primeiro algoritmo de agendamento proposto para a arquitetura foi denominado algoritmo de agendamento Sequencial. Para explicar seu funcionamento, é preciso considerar a arquitetura SUCCESS-HPON com  $W$  ONUs ( $W$  comprimentos de onda),  $M$  transmissores ajustáveis e  $N$  receptores ajustáveis.  $G$  refere-se ao *guard band*, em nano segundos, entre a chegada dos *frames* para efeitos de instabilidade de sincronismo e tempo de ajustes dos transmissores e receptores ajustáveis no OLT [Kim, 2005].

Os seguintes vetores com status de variáveis globais são utilizados:

- CAT: Vetor de tempos de disponibilidade dos canais.  $CAT[i]=t$ , onde  $i=1,2,\dots, W$ , significa que o comprimento de onda  $\lambda_i$  estará disponível para transmissão após o tempo  $t$ .
- TAT: Vetor de tempos de disponibilidade dos transmissores.  $TAT[i]=t$ , onde  $i=1,2,\dots, M$ , significa que o transmissor  $i$  estará disponível para transmissão após o tempo  $t$ .
- RAT: Vetor de tempos de disponibilidade dos receptores.  $RAT[i]=t$ , onde  $i=1,2,\dots, N$ , significa que o receptor  $i$  estará disponível para transmissão após o tempo  $t$ .
- RTT: Vetor de tempos de ida e volta entre OLT e ONUs.  $RTT[i]$  denota o RTT entre a  $ONU_i$  e o OLT.

Quando ocorre o agendamento de um *frame*, são escolhidos os transmissores e receptores que apresentam o próximo tempo de disponibilidade. Assumindo que o transmissor  $i$  e o receptor  $j$  serão os próximos, pode-se obter o tempo  $t$  de um *frame* destinado para a ONU  $k$  como:

$$t = \begin{cases} \max(RAT[j] + G - RTT[k] - G_{OH}, TAT[i] + G, CAT[k] + G) \\ \text{Se o frame é um grant para tráfego upstream} \\ \max(TAT[i] + G, CAT[k] + G) \\ \text{Se o frame é para tráfego downstream} \end{cases}$$

$G_{OH}$  é o atraso de transmissão para o *overhead* do *grant*, que consiste no *overhead*, *flags* de 8 *bits* e em campos do *frame* de *grant* à uma taxa de transmissão  $R$ . Se o *frame* é um *grant* para o tráfego *upstream*, o tempo de recepção do *frame upstream* correspondente originado pela ONU deve ser agendado no instante  $t + G_{OH} + RTT [k]$ .

Após o agendamento da transmissão ou recepção do *frame*, o *status* das variáveis deve ser atualizado:

$$TAT[i] = t + l/R$$

$$CAT[k] = t + l/R$$

Se o *frame* for um *grant* para o tráfego *upstream*:

$$RAT[j] = t + l/RTT + RTT, \text{ onde } l \text{ é o comprimento do } \textit{frame}.$$

Neste algoritmo, um *frame Ethernet* é encapsulado em um *frame SUCCESS* e é imediatamente colocado em uma fila FIFO que é compartilhada tanto pelo tráfego *downstream* quanto pelo tráfego *upstream*. Simulações apresentadas em [An et al., 2004] demonstraram pouca justiça entre os tráfegos. Em função do algoritmo não fornecer espaço para otimização, não se verificou um bom desempenho na vazão obtida, que ficou bem abaixo da capacidade total da rede.

Em [Kim et al., 2005], foram propostos os algoritmos *Batching Earliest Departure First* (BEDF) e *Sequential Scheduling with Schedule-Time Framing* (S<sup>3</sup>F) que utilizam o conceito de VOQs, uma para cada tipo de tráfego, *upstream* e *downstream*, e que foram concebidos para melhorar as métricas de vazão e justiça do algoritmo Sequencial originalmente proposto para a arquitetura. As seções seguintes fazem uma breve abordagem destes algoritmos.

#### **4.3.4.1 *Batching Earliest Departure First* - BEDF**

O principal objetivo deste algoritmo é fornecer espaço para otimização ao agregar e agendar de forma conjunta as múltiplas mensagens que são recebidas durante um período de

tempo (*batch period*) pré-definido. Baseado no algoritmo Sequencial, porém com diferenças no agendamento, o algoritmo BEDF varre as VOQs e pesquisa dentro de um conjunto de *frames* aquele com o valor ótimo baseado nos critérios estabelecidos em uma determinada política de agendamento. A política escolhida para o desenvolvimento do algoritmo foi a *Earliest Departure First* (EDF), que seleciona primeiramente os *frames* com próximo tempo de partida [Kim, 2005].

Após receber múltiplos *frames* no OLT, ao final do *batch period* o algoritmo apresenta o seguinte comportamento:

- 1- Escolhe os próximos transmissores e receptores disponíveis;
- 2- Calcula o próximo tempo de transmissão para o primeiro frame não agendado em VOQ não agendada;
- 3- Seleciona o frame através da política EDF e, caso seu tempo de transmissão esteja dentro do próximo ciclo de agendamento, é agendado. Caso o tempo de transmissão esteja além deste período, o agendamento é cancelado e a VOQ é marcada como não agendada. Se for um *grant*, a recepção do frame *upstream* correspondente é dada por  $G_{OH} + RTT$ ;
- 4- Atualiza o *status* das variáveis de transmissores, canais e, se necessário, de receptores;
- 5- Repete o procedimento de 1 a 4 até que não haja mais nenhum frame marcado como não agendado ou que todas as VOQs estejam marcadas como não agendadas.

O agendamento baseado em períodos bem como a participação das VOQs no comportamento do BEDF são apresentados na Figura 23.

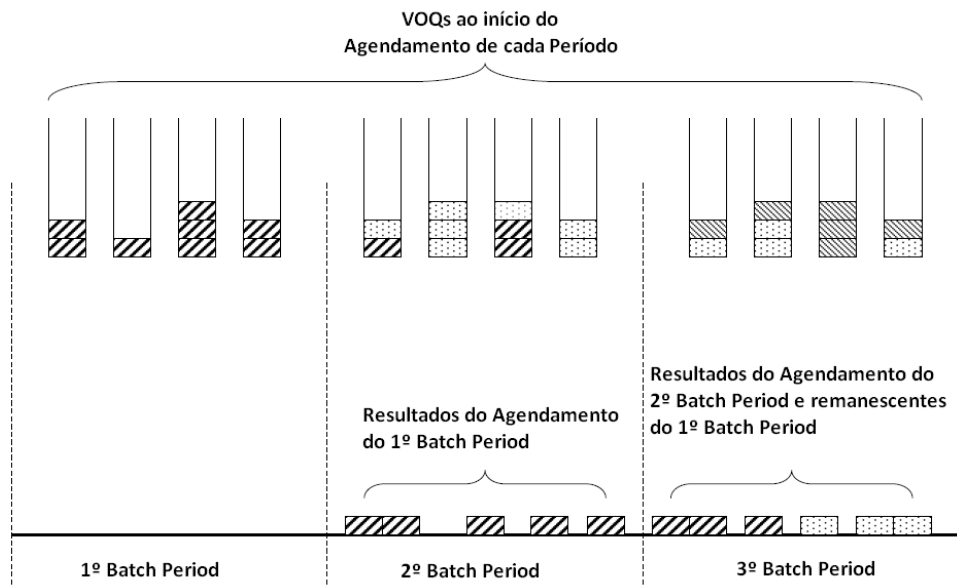


Figura 23 – Exemplo de agendamento no BEDF [Kim, 2005].

#### 4.3.4.2 Sequential Scheduling with Schedule-Time Framing - S<sup>3</sup>F

O S<sup>3</sup>F também é um algoritmo baseado no algoritmo Sequencial, mas difere deste por realizar o agendamento dos frames sequencialmente ao final de cada transmissão, exceto nos casos em que o frame é armazenado em uma VOQ vazia (quando é imediatamente agendado após sua chegada).

Este algoritmo também utiliza *grants*, assim como nos tráfegos *upstream*, para as transmissões *downstream*, e implementa o *schedule-time framing* para os *frames Ethernet* presentes nas VOQs *downstream* para solucionar o problema da baixa eficiência de transmissão do algoritmo sequencial original. O grande benefício da utilização do *schedule-time framing* do tráfego *downstream* é encapsular múltiplos *frames Ethernet* em um único *frame SUCCESS* e assim reduzir o overhead.

A operação do algoritmo S<sup>3</sup>F é apresentada a seguir. Ao final de cada transmissão do *frame SUCCESS*, ou quando o *frame Ethernet* chega a uma VOQ vazia:

- 1- Escolhe os próximos transmissores e receptores disponíveis;
- 2- Levando em consideração o tempo de disponibilidade dos transmissores e dos receptores, agenda o próximo tempo de transmissão para os dados da VOQ; se

a VOQ é para *grants upstream*, levar em consideração a variável MAX\_GRANT, que define seu tamanho máximo, a disponibilidade dos receptores e o RTT da ONU;

- 3- Encapsula os dados enfileirados (*Ethernet frames*) em um *frame SUCCESS*; o tamanho máximo do ultimo é determinado pelo contador de transmissão *downstream* da VOQ;
- 4- Atualiza o *status* das variáveis de disponibilidade dos transmissores, receptores e canais, bem como do contador de tráfego *downstream*;

O contador da transmissão *downstream* busca assegurar justeza entre os tráfegos. O contador é aumentado, baseado no tamanho da VOQ correspondente, quando requisições do tráfego *upstream* chegam ao OLT e é diminuído a medida que o tráfego *downstream* é transmitido. A Figura 24 apresenta o pseudocódigo do algoritmo S<sup>3</sup>F.

```
begin
  if VOQ[i] is not empty then
    numBits ← 0;
    pos ← 0;
    ptr ← &ethFrame(VOQ[i], pos);
    repeat
      dsTxCtr[i] ← dsTxCtr[i] - length(*ptr);
      numBits ← numBits + length(*ptr);
      pos ← pos + 1;
      ptr ← &ethFrame(VOQ[i], pos);
      if ptr is NULL then
        // no more frame to schedule
        exit the loop;
      end
    until dsTxCtr[i] < length(*ptr);
    schedule the transmission of a SUCCESS frame whose
    payload length is numBits;
    // using the sequential scheduling
    algorithm in Fig. 5
    store pos for the scheduled transmission later;
  end
end
```

Figura 24 – Pseudocódigo do Algoritmo S<sup>3</sup>F [Kim, 2005].

#### 4.4 HGS-PQ PARA ARQUITETURA SUCCESS-HPON

Conforme verificado anteriormente na arquitetura SUCCESS-HPON, os transmissores e receptores ajustáveis localizados no OLT são responsáveis tanto pela transmissão do tráfego *downstream* quanto pela transmissão e recepção do tráfego *upstream*. Isto deve-se ao fato das ONUs não possuírem fonte óptica. Isto faz do desenvolvimento de um algoritmo de agendamento eficiente e capaz de gerenciar todos os recursos da arquitetura uma tarefa nada trivial. Tal algoritmo deve manter *status* de todos os componentes compartilhados, comprimento de onda alocado para uma determinada ONU, seus *round trip times* (RTTs), além de organiza-los no tempo e nos comprimentos de onda corretos para realizar as transmissões.

Além de gerenciar todos os recursos da arquitetura SUCCESS-HPON, o principal objetivo do algoritmo HGS-PQ é oferecer não apenas eficiência, mas também controle ao OLT, fornecendo espaço para otimização e implementação de QoS. O algoritmo utiliza o conceito de VOQs para garantir proteção entre os tráfegos e sua abordagem híbrida vem do tipo de *framework* utilizado para agendamento dos *grants upstream*.

Através do *framework online JIT*, o algoritmo pode apresentar comportamento *online*, agendando somente uma única requisição *upstream*, *offline*, por agendar todas as requisições, como também pode agendar uma quantidade intermediária de requisições, superior a um e inferior à quantidade máxima. A quantidade de requisições a serem agendadas dependerá diretamente da disponibilidade dos recursos no OLT e dos comprimentos de onda.

Para agendamento do tráfego *upstream*, após o recebimento de uma mensagem de REPORT originada por uma ONU, o algoritmo HGS-PQ verifica se todas as VOQs *upstream* localizadas no OLT estão vazias, o que representa a primeira requisição recebida e o início de um novo ciclo de agendamento. Em seguida, o algoritmo verifica a disponibilidade dos transmissores e receptores através de variáveis de *status* de disponibilidade (CAT, RAT e TAT, herdadas do algoritmo seqüencial original), reservando-os para o instante em que permanecerem livres.

O tempo de disponibilidade dos recursos (*tdisp*) será atribuído a uma variável denominada AG\_GLOBAL, que representará o marco para o agendamento de todas as demais requisições que forem recebidas até aquele instante. Qualquer requisição que chegar antes do tempo definido pela variável AG\_GLOBAL será armazenada em sua VOQ *upstream*

correspondente e aguardará o momento definido por esta variável para agendamento coletivo com as demais requisições. Na ocorrência de disponibilidade imediata de recursos durante a recepção da primeira mensagem de REPORT, a requisição é logo agendada e o *grant* é transmitido à ONU. Trata-se do princípio *just-in-time*, não adicionando atrasos desnecessários e fornecendo espaço para otimização através do agendamento conjunto de múltiplas requisições.

Ao atingir o momento AG\_GLOBAL, o algoritmo HGS-PQ realiza o agendamento conjunto das múltiplas mensagens de REPORT recebidas pelo OLT durante aquele ciclo de agendamento e concede os *grants* de transmissão às respectivas ONUs em ordem de prioridade através de regras estabelecidas em políticas de agendamento. A Figura 25 apresenta um esquema para representar este processo.

Na Figura 25(a), o OLT recebe uma mensagem de REPORT originada pela ONU 2 no instante  $t1$ . Neste momento o HGS-PQ verifica o *status* de todas as VOQs *upstream* e constata que trata-se da primeira requisição, e conseqüentemente, do início um novo ciclo de agendamento. Verifica também que os recursos no OLT estarão disponíveis no instante  $t_{disp}$ . A variável AG\_GLOBAL recebe este tempo e a mensagem de REPORT é armazenada em sua VOQ correspondente.

Na Figura 25(b) o OLT recebe, no instante  $t2$ , uma outra mensagem de REPORT, agora originada pela ONU 1. Após verificar que a variável AG\_GLOBAL já estabeleceu um marco para o agendamento *upstream*, o HGS-PQ armazena a mensagem em sua respectiva VOQ *upstream*, onde aguardará o momento do seu agendamento conjunto com as demais requisições.

A Figura 25(c) representa o momento em que o tempo atinge o marco AG\_GLOBAL. Percebe-se que a mensagem de REPORT da ONU 3 ainda não foi recebida, portanto, o HGS-PQ somente agenda os *grants* para as requisições armazenadas nas VOQs 1 e 2 de forma conjunta e baseando-se em regras definidas a partir de uma política de agendamento. Em seguida os *grants* são transmitidos, as VOQs 1 e 2 são então esvaziadas e o algoritmo HGS-PQ aguarda a próxima mensagem de REPORT para dar início a um novo ciclo de agendamento, repetindo todo processo descrito.



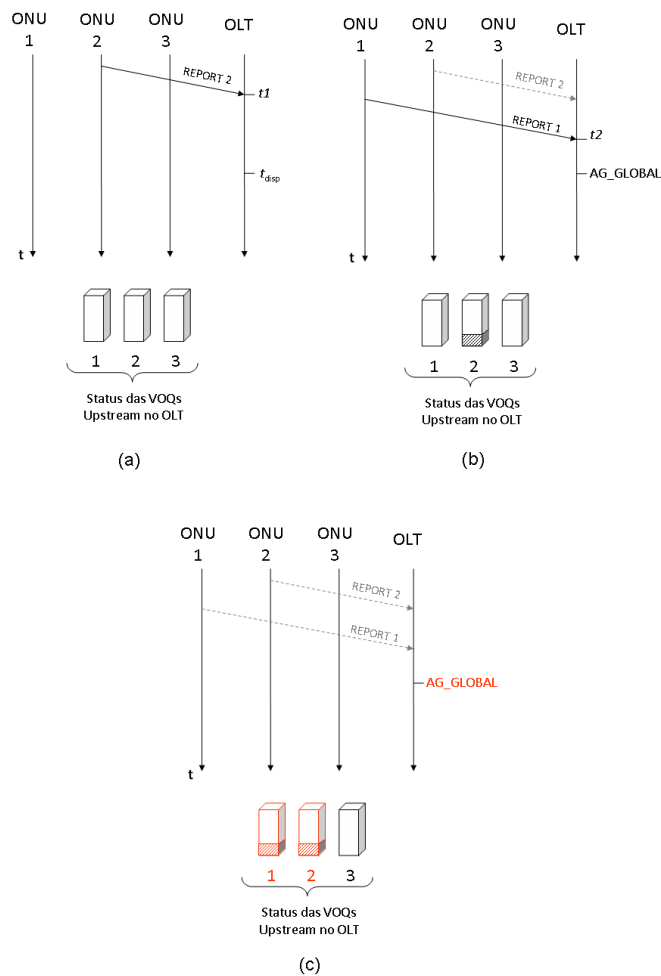


Figura 25 – Processo de definição do marco AG\_GLOBAL.

Nota-se que a escolha do *framework* de agendamento para transmissões *upstream* interfere diretamente no nível de controle a ser oferecido ao OLT e a ser gerenciado pelo algoritmo de agendamento. O HGS-QP, através da condição de disponibilidade de recursos, agrupa de maneira *just-in-time* um conjunto de requisições a serem agendadas, contribuindo para redução de atrasos na rede, por não aguardar atrasos desnecessários ou períodos pré-definidos, como no BEDF, e também provê espaço para implementação de QoS e priorização de filas através da utilização de políticas de agendamento.

Uma vez que o problema de agendamento de *grants* para transmissão *upstream* em WDM-PONs pode ser formulado através de notações teóricas, como por exemplo utilizando o modelo de máquinas paralelas definido em [Pinedo, 2002], diversas políticas de agendamento ou regras compostas podem ser implementadas no algoritmo HGS-PQ. As políticas determinam como o agendamento será realizado e contribuem com a redução de

atrasos, priorização de tráfegos, priorização de ONUs, garantias de bons desempenhos na utilização dos canais, entre outras otimizações.

Uma das alternativas é utilizar a política LQF que agenda a ordem de transmissão de diferentes ONUs baseada no *status* momentâneo de suas VOQs. As VOQs com maior quantidade de dados tendem a produzir maiores atrasos na rede. Para solucionar este problema, o algoritmo HGS-PQ leva em consideração o tamanho das VOQs *downstream* durante o agendamento das requisições *upstream* para estabelecer as prioridades de agendamento.

Uma vez que o *framework* utilizado seleciona um conjunto de requisições concorrentes durante um determinado ciclo de agendamento, a política LQF definirá a sequência de priorização de requisições através da análise das VOQs *downstream* no OLT. O algoritmo HGS-PQ agendará por primeiro aquelas requisições que possuem as VOQs *downstream* correspondentes com maior quantidade de dados e em seguida enviará os *grants* com tamanho pré-estabelecido. O método utilizado pelo algoritmo HGS-PQ para a definição do tamanho dos *grants* é o *LIMITED*, o qual sempre fornece o mínimo entre a largura de banda solicitada pela ONU e o tamanho máximo do *grant*. O método *LIMITED* é definido por  $G_i = \min(R_i, G_{max})$ , onde:

- $G_i$  - Representa o tamanho do *grant* para a ONU  $i$ ;
- $R_i$  - Representa a requisição proveniente da ONU  $i$ ;
- $G_{max}$  - Representa o tamanho máximo do *grant*.

Enquanto não ocorre o recebimento de requisições para o tráfego *upstream*, o algoritmo HGS-PQ reserva os recursos da rede e agenda continuamente, de forma sequencial, os *frames downstream*. Entretanto, para manter justeza entre os tráfegos, após o agendamento *upstream*, o HGS-PQ também concede *grants* para a transmissão *downstream* em processo semelhante ao verificado no algoritmo S<sup>3</sup>F. Para isto, o algoritmo verifica a quantidade de informação presente na VOQ *downstream* correspondente à requisição que foi previamente agendada e, através da variável de controle MAX\_GRANT, envia um novo *grant* com o conteúdo presente nesta fila. A Figura 26 demonstra um exemplo da utilização da política LQF e do mecanismo de justeza utilizado pelo algoritmo HGS-PQ.

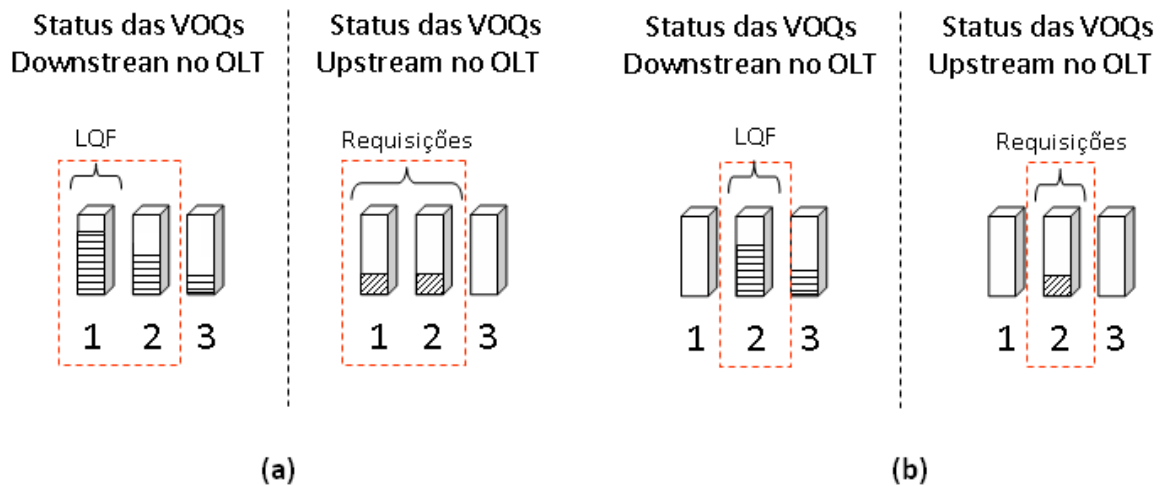


Figura 26 – Utilização da Política LQF e mecanismo de justiça entre os tráfegos

A Figura 26(a) apresenta o status momentâneo das VOQs *downstream* e *upstream* no instante AG\_GLOBAL. Nota-se que somente foram recebidas requisições nas VOQs *upstream* 1 e 2 até este momento. Durante o agendamento, a política LQF verifica as VOQs *downstream* 1 e 2 e constata que a VOQ 1 possui maior quantidade de dados, logo, a prioridade é dada para a requisição originada pela ONU 1, que recebe a concessão do *grant* para tráfego *upstream*. Em seguida um *grant* também é concedido para o seu tráfego *downstream* presente em sua VOQ *downstream* correspondente.

Através da variável MAX\_GRANT, o algoritmo HGS-PQ controla a inserção dos dados *downstream* respeitando o limite máximo do *grant* concedido. A Figura 26(b) apresenta o estágio posterior ao agendamento, onde tanto a VOQ 1 *downstream* quanto a *upstream*, agora estão vazias. O algoritmo então parte para o agendamento da próxima requisição, neste caso da ONU 2, repetindo o processo.

Conforme mencionado anteriormente, diversas políticas de agendamento ou regras compostas podem ser implementadas no algoritmo HGS-PQ. Para o mesmo propósito, o processo de priorização também poderia ser efetuado através da regra de distribuição SPT, que selecionaria primeiramente a maior requisição entre as concorrentes. Neste caso, o foco de priorização estaria nas filas presentes nas ONUs, e não mais nas VOQs localizadas no OLT. O algoritmo HGS-PQ é aberto para implementação de qualquer política de agendamento, onde o foco do problema abordado é que define a sua escolha.

A operação geral do algoritmo HGS-PQ é representada através do fluxograma apresentado na Figura 27.

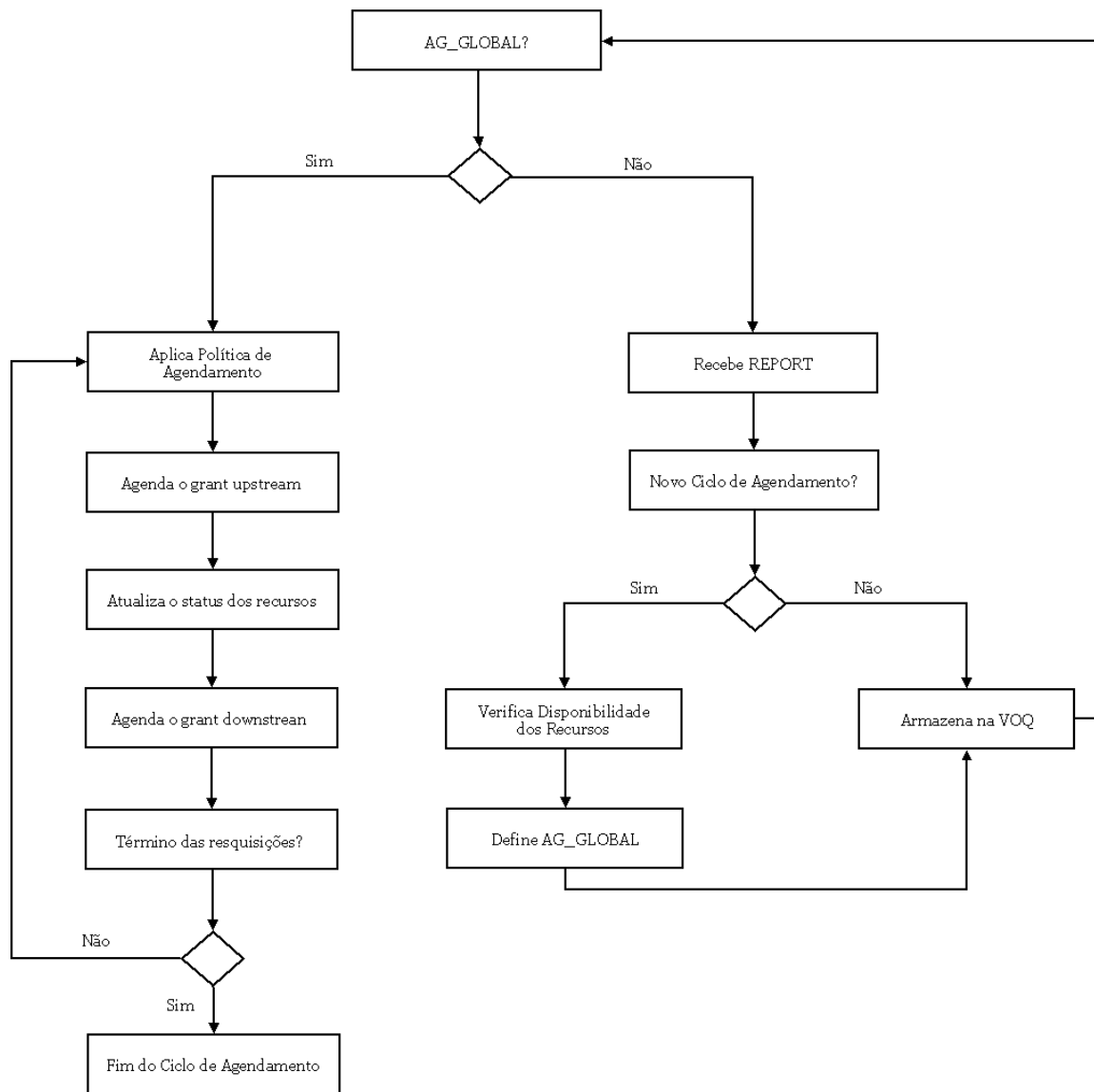


Figura 27 – Operação do algoritmo HGS-PQ

O Capítulo 5 apresentará uma análise do algoritmo HGS-PQ comparado aos demais algoritmos propostos na literatura para a arquitetura SUCCESS-HPON. A Tabela 3 apresenta uma síntese dos algoritmos aqui abordados.

Tabela 3 – Algoritmos propostos para a arquitetura SUCCESS-HPON

Algoritmo	Resumo	Objetivos	Framework	Politica	Mecanismos
BEDF	Agendamento em período pré-definido e priorização dos primeiros frames da fila	Prover espaço para otimização	Online	EDF	<i>Batch Period</i>
S <sup>3</sup> F	Agendamento instantâneo e sequencial dos frames no próximo canal suportado	Prover eficiência no agendamento e justeza entre os tráfegos	Online	Sequencial	<i>Grants upstream/downstream e Schedule-time framing</i>
HGS-PQ	Agendamento JIT para priorização de filas e QoS	Prover justeza entre os tráfegos, espaço para otimização e eficiência no agendamento	Híbrido	LQF, SPT, entre outras	Agendamento JIT baseado na disponibilidade de recusos e grants upstream/downstream

## 5 ANÁLISE DA PROPOSTA

### 5.1 INTRODUÇÃO

A avaliação do algoritmo HGS-PQ é dividida em uma análise comparativa teórica com os demais algoritmos já propostos para a arquitetura SUCCESS-HPON e no desenvolvimento do algoritmo em um ambiente de simulação computacional denominado OMNET++ com o intuito de fundamentar a proposta aqui apresentada.

A análise comparativa teórica buscou confrontar os efeitos dos principais mecanismos utilizados pelos algoritmos de agendamento na garantia de justiça na alocação dos tráfegos upstream e downstream, bem como nos atrasos e na utilização dos canais. Já a análise em ambiente de simulação computacional envolveu o estudo prévio sobre as principais funcionalidades e componentes do modelo utilizado para simulação da arquitetura SUCCESS-HPON, desenvolvido pela equipe do Laboratório de Pesquisas em Fotônica e Redes (Photonics and Networking Research Laboratory – PNRL) da Universidade de Stanford, e o desenvolvimento de um novo módulo de agendamento para o algoritmo HGS-PQ, compatível com o módulo OLT do modelo, contendo todas as suas funcionalidades.

Inicialmente, este capítulo apresenta a análise comparativa teórica do algoritmo HGS-PQ com os demais algoritmos já propostos na literatura para a arquitetura SUCCESS-HPON. São apresentadas suas principais características e como seus mecanismos interferem nos atrasos e na utilização dos canais. Em seguida o ambiente de simulação computacional é descrito, apresentando os cenários, metodologia e parâmetros utilizados. Por fim são apresentados os resultados de desempenho obtidos através das métricas de atraso e vazão.

## 5.2 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS ALGORITMOS

A fim de avaliar o algoritmo HGS-PQ bem como seus mecanismos para o agendamento dos tráfegos *upstream* e *downstream*, buscou-se realizar comparações com os principais algoritmos propostos para a arquitetura SUCCESS-HPON apresentados na Seção 4.3.4. Para isto, são analisados seus objetivos, técnicas de agendamento *upstream* e *downstream*, políticas de agendamento utilizadas, bem como os principais fatores que interferem no desempenho destes algoritmos.

Os algoritmos BEDF e S<sup>3</sup>F foram desenvolvidos com a finalidade de corrigir os problemas de justiça na alocação dos tráfegos *upstream* e *downstream* verificados no algoritmo Sequencial inicialmente proposto para a arquitetura. Neste algoritmo foram verificados grandes atrasos e baixa utilização dos canais por utilizar uma única fila FIFO compartilhada entre os tráfegos [An et. al., 2004]. Para solucionar este problema, tanto o BEDF quanto o S<sup>3</sup>F utilizam VOQs para fornecer proteção aos seus *frames upstream* e *downstream*.

Estes algoritmos adotam diferentes abordagens para agendamento dos tráfegos e gerenciamento dos recursos da arquitetura SUCCESS-HPON. O algoritmo BEDF armazena múltiplos *frames* em suas VOQs e realiza o agendamento destes somente ao final de um período de tempo pré-definido, denominado *Batch Period*. Desta maneira, o algoritmo busca prover espaço para otimização ao agendar múltiplos *frames downstream* de uma VOQ de forma conjunta através da política EDF, priorizando *frames* com o próximo tempo de partida. A utilização da política EDF busca simplificar a pesquisa pelos *frames* nas VOQs reduzindo a complexidade computacional do algoritmo e os atrasos para execução da política.

O efeito causado pelo armazenamento de *frames* em um determinado período de tempo pode ser negativo se este tempo for muito alto. Conforme este tempo aumenta, maior pode ser a quantidade de *frames* recebidos e maior será o tempo de execução da política, fator que prejudica uma dos principais objetivos do algoritmo: prover espaço para otimização. Estudos em [Kim et al., 2005] apontaram o tempo de 1 ms como sendo o valor ideal para o *Batch Period*.

Já o algoritmo S<sup>3</sup>F busca agendar os *frames downstream* e as requisições *upstream* da maneira mais rápida possível. Para isto, utiliza o *framework online* de agendamento onde as requisições são agendadas e transmitidas a partir do momento que os

recursos estejam disponíveis no OLT. O algoritmo utiliza os mecanismos de *Schedule-time framing*, agendando múltiplos *frames Ethernet* dentro de um único frame SUCCESS a fim de reduzir o *overhead* nas transmissões, e também fornece *grants* ao tráfego *downstream* para garantir justiça. [Kim et al. 2005] verifica que o valor ideal para o tamanho máximo dos *grants* a serem concedidos pelo algoritmo é de 5 Mbits.

A principal finalidade do algoritmo S<sup>3</sup>F é garantir eficiência no agendamento dos *frames*, agendando cada um de forma individual e sequencial no momento de sua transmissão. Em função disto, o algoritmo deixa de lado algumas questões importantes de gerenciamento e controle, como priorização de *frames* ou filas.

O algoritmo HGS-PQ proposto apresenta um comportamento híbrido buscando garantir tanto eficiência no agendamento justo dos tráfegos *upstream* e *downstream* quanto controle ao OLT no agendamento de ambos os tráfegos através de políticas e teorias de agendamento. Para isto o algoritmo se baseia na disponibilidade dos seus recursos para agregar requisições *upstream* através do *framework online just-in-time*, não adicionando atrasos desnecessários e fornecendo os *grants* aos tráfegos conforme vão sendo priorizados.

Dependendo do nível de controle a ser fornecido ao OLT, o processamento das políticas de agendamento pode adicionar atrasos significativos na alocação dos tráfegos, o que torna necessário a implementação de mecanismos que minimizem este problema. É com esta finalidade que o algoritmo HGS-PQ, assim como no agendamento *upstream*, também fornece *grants* para o tráfego *downstream*, esvaziando as VOQs e contribuindo para a redução dos atrasos de enfileiramento.

Nota-se que cada algoritmo possui abordagens diferentes para tentar minimizar os atrasos da rede e obter bons desempenhos no gerenciamento dos recursos. A proposta do algoritmo HGS-PQ apresenta características que favorecem a implementação das mais diversas políticas que busquem solucionar variadas questões relacionadas ao problema do agendamento em ambientes multicanais. Também é importante ressaltar que um dos grandes benefícios fornecidos pelo algoritmo HGS-PQ é apresentar um equilíbrio entre eficiência e controle, propondo espaço para otimização e priorização através do agendamento de requisições, abordagem não verificada nos demais algoritmos.

A Tabela 4 apresenta uma síntese de como os principais mecanismos utilizados pelos algoritmos de agendamento descritos interferem na alocação dos tráfegos *upstream* e *downstream*, bem como na utilização dos canais.



Tabela 4 – Síntese da análise comparativa

Algoritmo	Transmissão Downstream	Transmissão Upstream	Utilização dos Canais
BEDF	Batch Period interfere negativamente	Atrasos constante e pré-determinado	Pior caso
S <sup>3</sup> F	Menores atrasos por fornecer grants e realizar agendamento sequencial	Agendamento sequencial. Baixo atraso.	Melhor caso
HGS-PQ	Ganho de eficiência por utilizar grants	Atrasos de processamento da política minimizados através do framework <i>just-in-time</i>	Intermediário

### 5.3 SIMULAÇÕES EM AMBIENTE COMPUTACIONAL

O principal objetivo do desenvolvimento do algoritmo HGS-PQ em ambiente de simulação computacional é de fundamentar a análise comparativa, bem como de aprofundar a análise sobre a proposta. O modelo de simulação utilizado foi desenvolvido no simulador discreto de eventos OMNET++ [Varga, 2003] e representa a arquitetura SUCCESS-HPON com todas as suas características e componentes.

Esta etapa envolveu estudos sobre o funcionamento e composição interna do modelo, desenvolvimento e operação de um novo módulo de agendamento contendo as funcionalidades que retratam as características principais do algoritmo HGS-PQ, integração deste módulo com o módulo já existente do OLT e avaliação dos algoritmos em diferentes cenários e configurações.

Esta seção apresentará os cenários, metodologia e parâmetros utilizados bem como os resultados obtidos através das simulações.

### 5.3.1 CENÁRIOS

Para a avaliação comparativa do desempenho dos algoritmos, foram utilizados dois cenários de simulação que representam a arquitetura SUCCESS-HPON com 16 ONUs distribuídas de forma variada ao longo de diferentes áreas de abrangência. Em ambos os cenários, o OLT estabelece uma conexão ponto-a-ponto com cada nó remoto, que por sua vez multiplexa e demultiplexa o comprimento de onda para as ONUs atreladas a ele. Considerando esta característica física dos nós remotos, para a quantidade mencionada de ONUs são utilizados 16 comprimentos de onda.

A Figura 28 demonstra o primeiro cenário que consiste nas ONUs agrupadas em quatro nós remotos e distribuídas ao longo de uma área de abrangência de 20 km. Estes nós remotos estão distantes a 5, 10, 15 e 20 km do OLT, respectivamente. Este cenário é semelhante ao cenário abordado em [Kim et. al, 2005] e sua utilização tem por finalidade analisar o algoritmo HGS-PQ sob as mesmas condições que os algoritmos BEDF e S<sup>3</sup>F foram analisados.

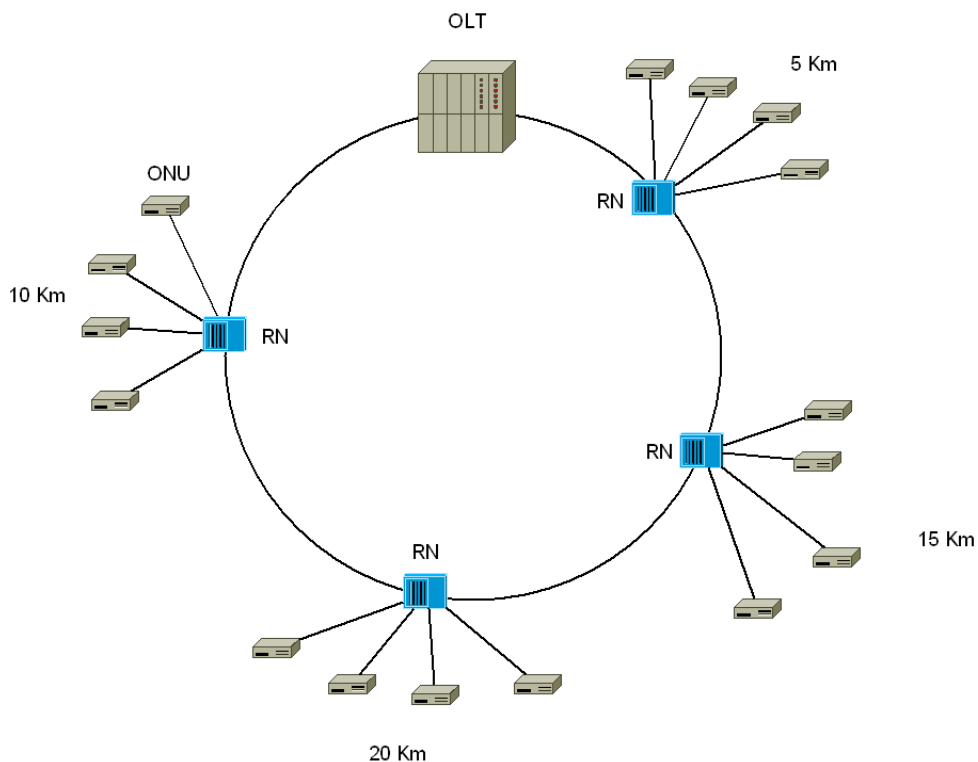


Figura 28 – Cenário 1: Arquitetura SUCCESS-HPON com 20 km de alcance.

O segundo cenário é representado na Figura 29, onde as ONUs estão agrupadas em cinco nós remotos e distribuídas ao longo de 100 km. Estes nós remotos estão distantes a 5, 25, 50, 85 e 100 km do OLT, respectivamente. O objetivo deste cenário é simular a arquitetura SUCCESS-HPON em um contexto de longo alcance e avaliar o impacto de grandes atrasos RTTs no desempenho dos algoritmos.

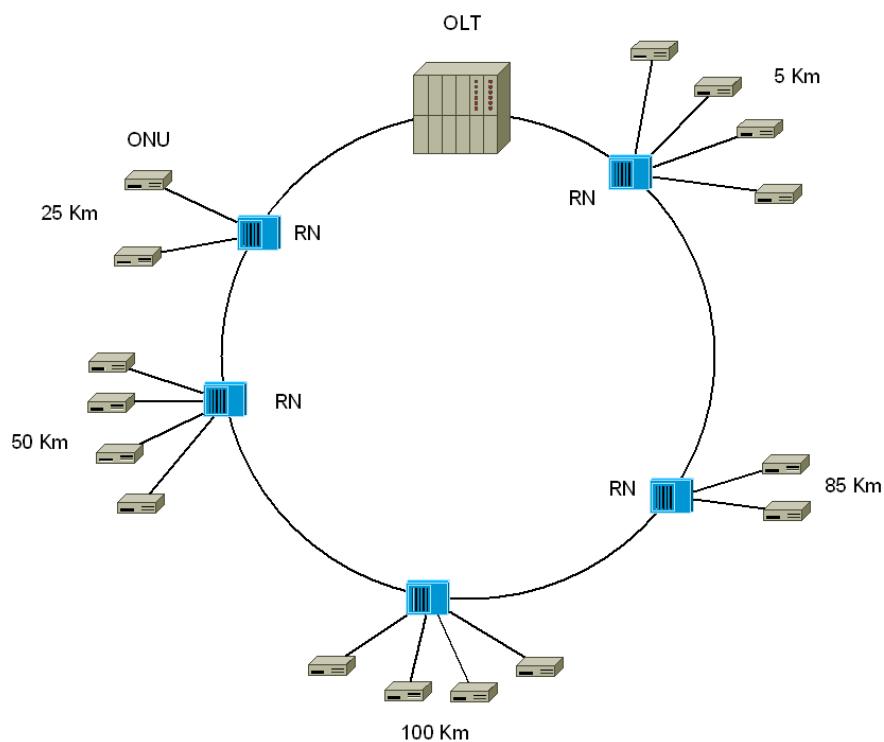


Figura 29 – Cenário 2: Arquitetura SUCCESS-HPON com 100 km de alcance.

### 5.3.2 METODOLOGIA

O principal objetivo das simulações é analisar o desempenho relativo do algoritmo HGS-PQ, comparado aos demais algoritmos BEDF e  $S^3F$ , no agendamento de recursos, ao invés de representar as condições reais de tráfego das aplicações. Por este motivo, é utilizada uma distribuição de *Poisson* para a geração dos pacotes IP *downstream*, uniformemente distribuídos às ONUs, e *upstream*, baseada na análise dos traces verificados em [Thompson et. al., 1997].

Os recursos localizados no OLT (transmissores e receptores) são compartilhados tanto para as transmissões *downstream* quanto *upstream*, e por esta razão, suas quantidades interferem diretamente no desempenho dos algoritmos analisados [Kim et. al., 2005]. A fim de avaliar o impacto da quantidade de recursos no desempenho do algoritmo HGS-PQ, serão avaliadas duas configurações de recursos no OLT. A Tabela 5 apresenta estas configurações bem como os respectivos limites de cargas totais oferecidas.

Tabela 5 – Configurações de Transmissores e Receptores no OLT

Transmissores (TX)	Receptores (RX)	Carga Total Oferecida (Gbps)
4	4	1,2, ..., 40
6	6	1,2, ..., 60

A carga total oferecida na rede representa a soma das taxas de geração dos tráfegos *downstream* e *upstream* em uma proporção de 2:1, respectivamente, ou seja, por representar uma característica das redes de acesso, a geração do tráfego *downstream* utilizada nas simulações equivale a duas vezes a do tráfego *upstream*. O Gráfico 1 demonstra como é realizada a distribuição de cargas de 1 a 10 Gbps entre os tráfegos através desta proporção, bem como a taxa de geração para cada uma das 16 ONUs distribuídas pela rede.

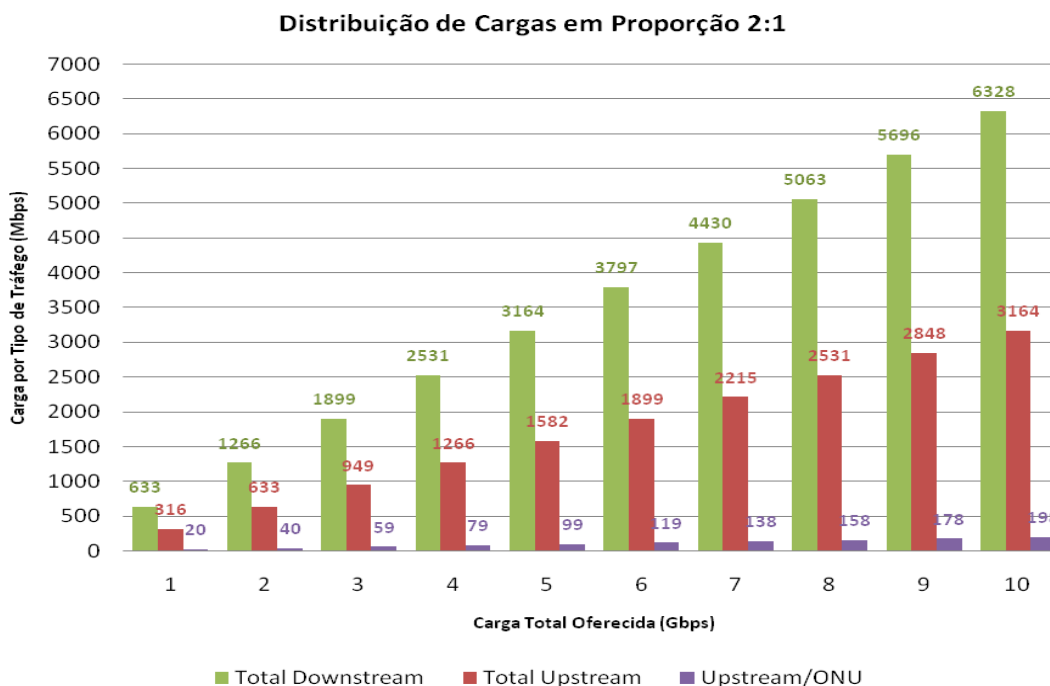


Gráfico 1 – Distribuição das cargas totais entre os tráfegos

A carga limite para cada configuração, representada na Tabela 5 pelos valores 20, 40 e 60, atende à relação da quantidade  $M$  de transmissores localizados no OLT multiplicada pela taxa  $R$  de transmissão dos canais ( $M \times R$ ), isto é, para  $M= 2$  e  $R= 10 \text{ Gbps}$ , a carga máxima da rede é de  $20 \text{ Gbps}$ , e assim por diante. Alguns fatores foram levados em consideração para o processo de simulação:

- O tempo de simulação para cada carga avaliada em ambos os cenários e configurações foi de 120 segundos;
- Foram realizadas 15 simulações com diferentes sementes geradoras para cada carga;
- Para a análise dos resultados foi considerado o intervalo de confiança com nível de confiança de 95%, calculado com base em [JAIN, 1991].

### 5.3.3 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS

Os valores padrões dos parâmetros específicos da arquitetura definidos em sua concepção [An et. al., 2004], como *Guard Band*, tamanho das VOQs, e *maxTXdelay*, foram todos mantidos para a realização das simulações. Em se tratando dos valores considerados ideais para *MAX\_GRANT* e *Batch Period*, utilizados pelos algoritmos S<sup>3</sup>F e BEDF, respectivamente, e avaliados em [Kim et al., 2005], foram mantidos a fim de se realizar análise comparativa sob as mesmas condições. Os principais parâmetros utilizados na simulação são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros e seus valores

Parâmetros	Valores
Taxa de Transmissão dos Canais (R)	10 Gbps
<i>Guard Band</i>	50 ns
Tamanho das VOQs	10 Mbytes
<i>ONU_TIMEOUT</i>	1 ms
<i>maxTXDelay</i>	2 ms
<i>MAX_GRANT</i>	5 Mbits
<i>Batch Period</i>	1 ms

### 5.3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados aqui apresentados demonstram o desempenho do algoritmo HGS-PQ considerando os cenários, a metodologia e os parâmetros previamente descritos nas seções anteriores. Em cada cenário, o desempenho do algoritmo proposto é avaliado sob as configurações de transmissores e receptores, descritos na seção 3.5.2, e comparado ao desempenho dos algoritmos BEDF e S<sup>3</sup>F através das métricas de vazão e atraso.

A seguir, são apresentados os resultados obtidos em cada um dos cenários abordados.

#### 5.3.4.1 Cenário 1: *SUCCESS-HPON com área de abrangência de 20 km*

Primeiramente serão apresentados os resultados para o OLT com sua primeira configuração de recursos: 4 TX e 4 RX.

O Gráfico 2 apresenta o atraso médio dos pacotes *downstream*. Percebe-se que todos os algoritmos apresentam atrasos semelhantes em baixas e médias cargas, ambos permanecendo abaixo de 2 ms. O algoritmo HGS-PQ apresentou comportamento bastante próximo ao algoritmo S<sup>3</sup>F por também utilizar o mecanismo de *grants* para o tráfego *downstream*. Já sob altas cargas, ambos se diferenciam pelo fato do S<sup>3</sup>F focar somente na eficiência do agendamento, enquanto o HGS-PQ também foca no controle e na priorização de filas.

O algoritmo BEDF apresentou o pior desempenho a partir do momento em que ficou submetido a cargas que representam 87% da capacidade total da rede, o que demonstra que o agendamento através de períodos pré-definidos interfere negativamente nas transmissões *downstream*.

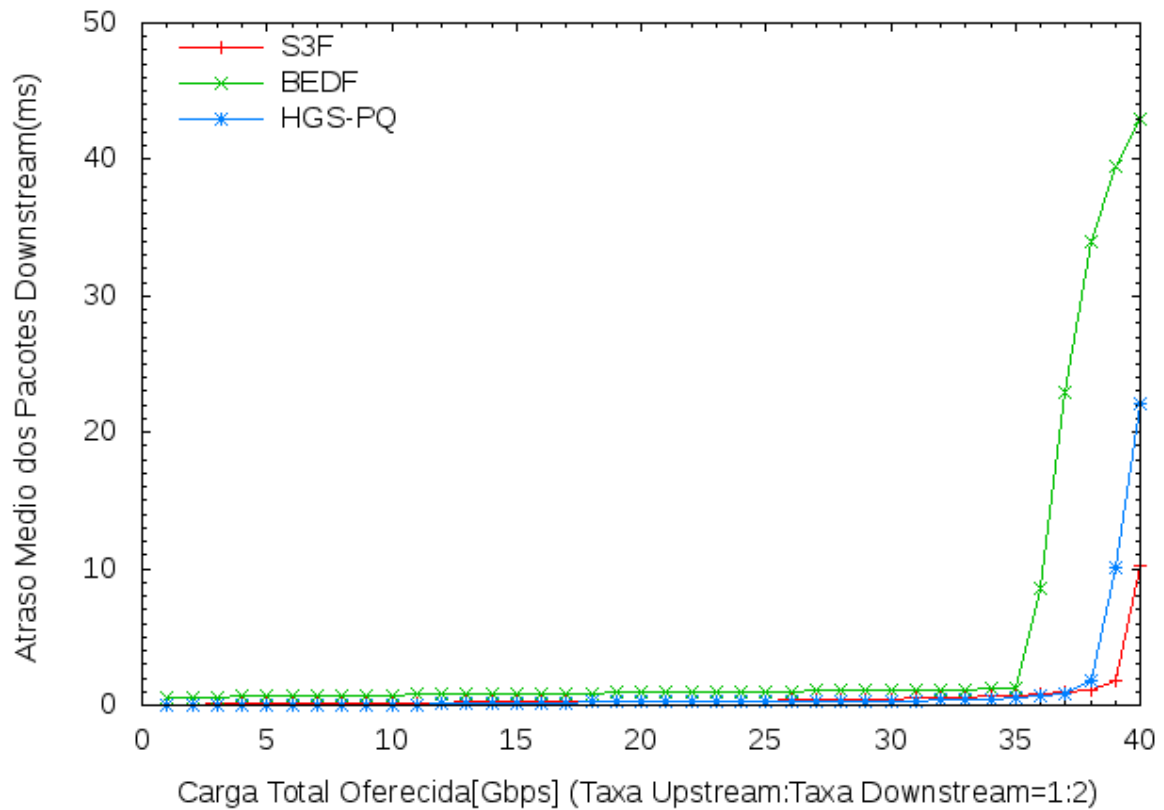


Gráfico 2 – Atraso Médio Downstream x Carga Total para 4TX/4RX.

O Gráfico 3 apresenta claramente a diferença entre as abordagens de agendamento do tráfego *upstream* sob altas cargas. Enquanto o algoritmo BEDF apresenta atraso médio *upstream* constante em função do *Batch Period* estabelecer tempos pré-definidos, o algoritmo HGS-PQ apresenta atrasos maiores sob altas cargas em função do tempo de processamento da política de agendamento LQF. Este comportamento é compreensivo pois além do algoritmo manter seus atrasos abaixo de 2 ms durante 95% das cargas avaliadas, também oferece vantagens para otimização.

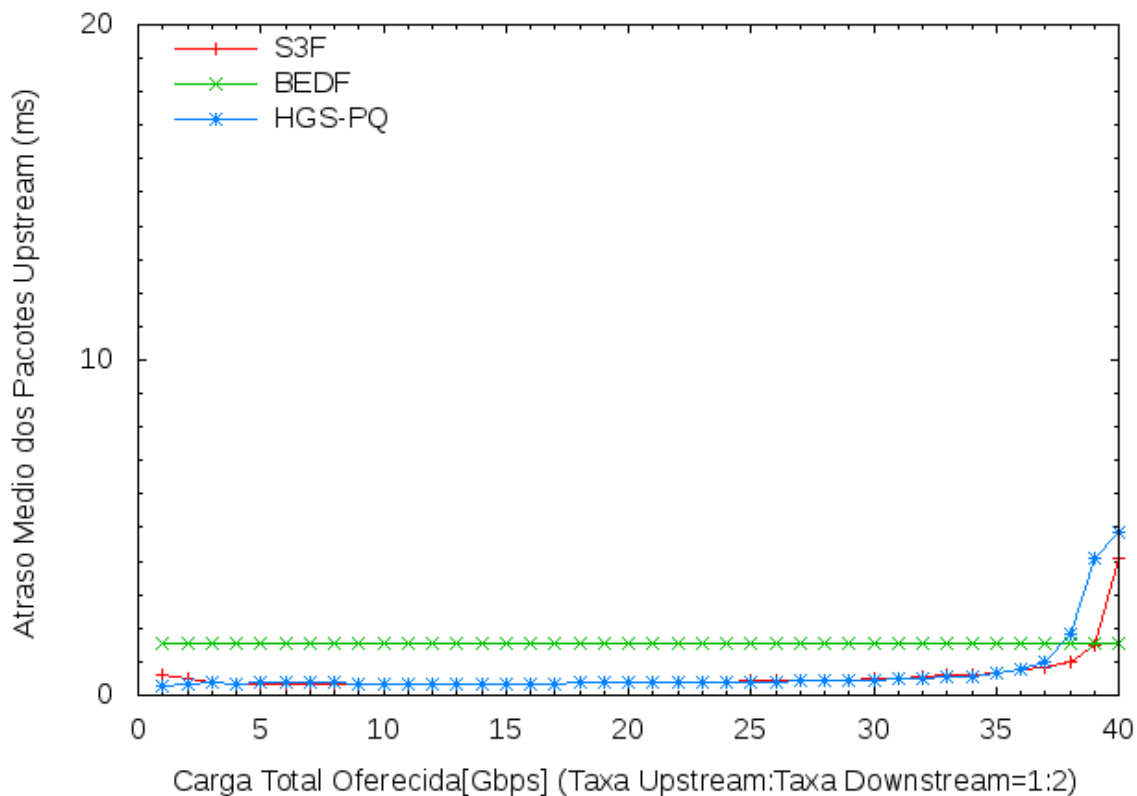


Gráfico 3 – Atraso Médio Upstream x Carga 4TX/4RX.

O atraso médio total é apresentado no Gráfico 4. A média total dos atrasos representa a média entre os atrasos *upstream* e *downstream* apresentados nos Gráficos 2 e 3. Verifica-se que o algoritmo HGS-PQ possui no geral um bom desempenho nos agendamentos, possuindo atrasos abaixo de 1 ms até aproximadamente atingir a carga de 38 Gbps (muito próxima da capacidade máxima da rede). Sua abordagem híbrida e o *framework just-in-time* demonstram contribuir para a implementação de um espaço para otimização sem interferir drasticamente nos atrasos da rede.



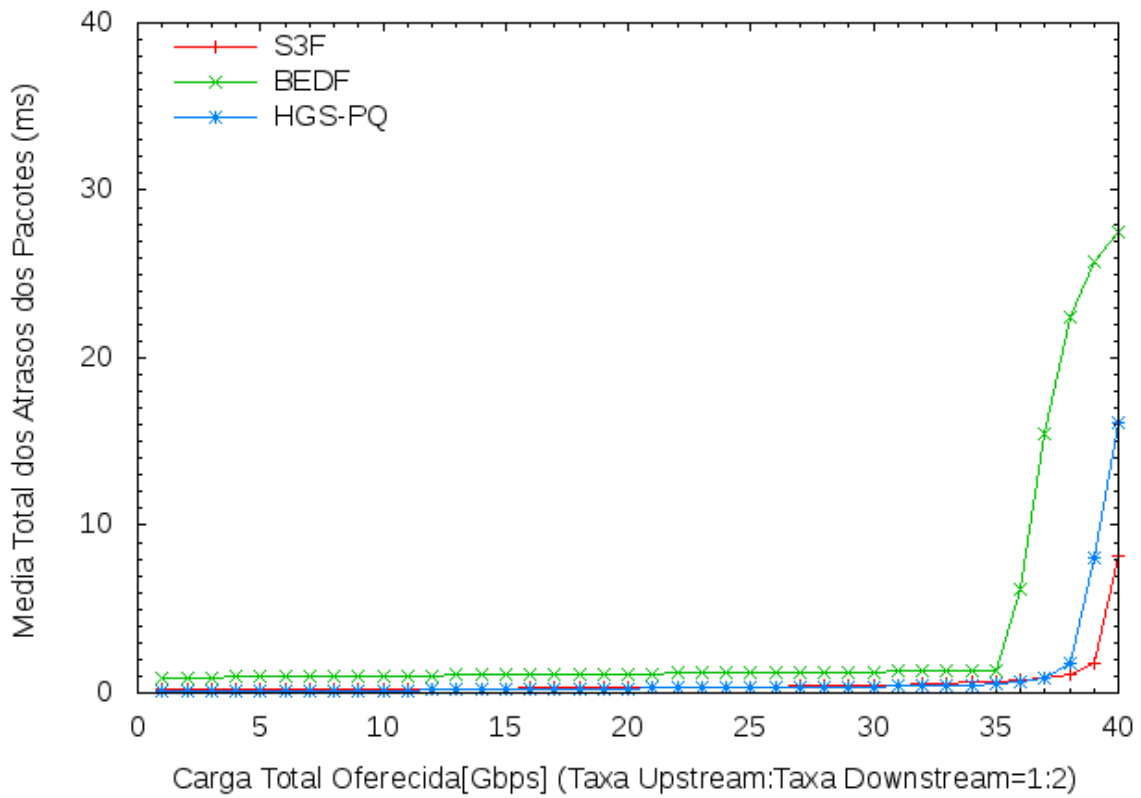


Gráfico 4 – Atraso Médio Total x Carga Total para 4TX/4RX.

O Gráfico 5 apresenta a vazão total verificada. Observa-se que o algoritmo HGS-PQ favorece a uma boa utilização dos canais, apresentando desempenho superior ao BEDF. O algoritmo adquire o índice de 95% de vazão, ficando bem próximo ao índice verificado pelo algoritmo S<sup>3</sup>F.

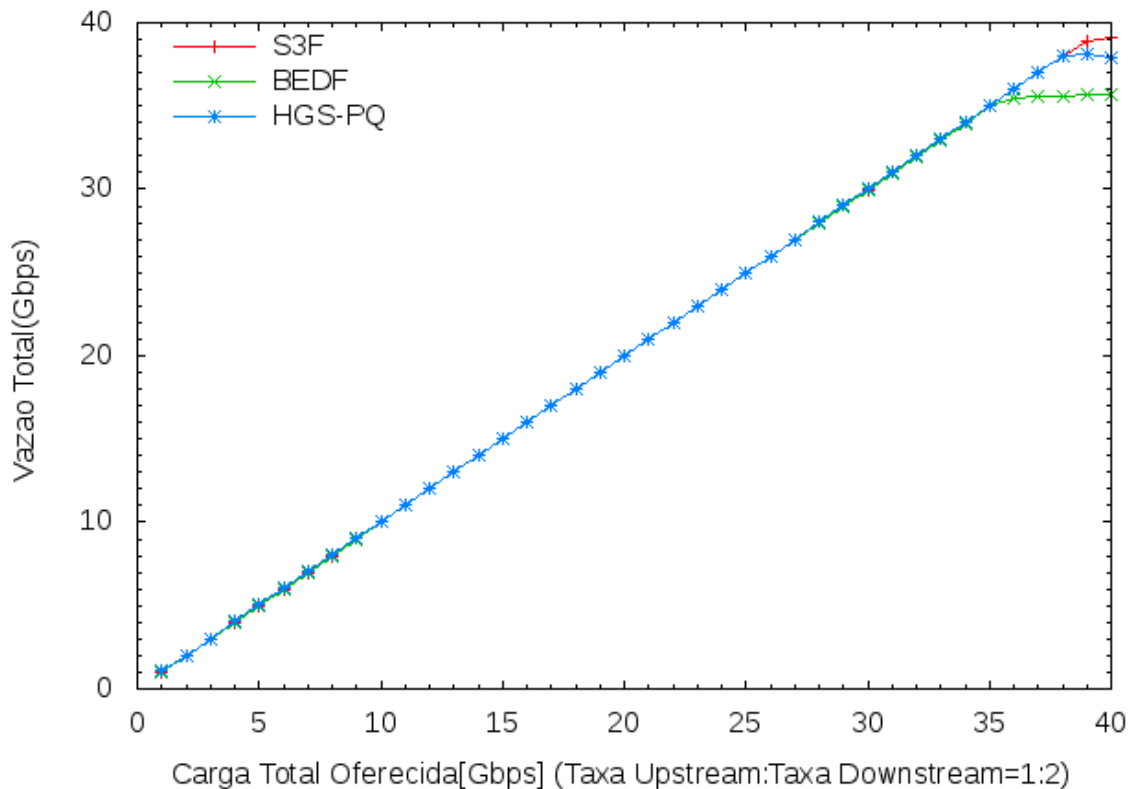


Gráfico 5 – Vazão Total x Carga Total para 4TX/4RX.

Através dos resultados obtidos para esta configuração, conclui-se que o algoritmo HGS-PQ obteve desempenho satisfatório e apresenta-se como uma boa solução para prover espaço para otimização uma vez que não interfere drasticamente nas métricas de atraso e vazão ao longo da grande maioria de cargas avaliadas. Isto se justifica principalmente em função do modo de operação do *framework just-in-time* e da concessão de *grants* ao tráfego *downstream*.

A seguir será avaliado o impacto do aumento de recursos no OLT no desempenho do algoritmo HGS-PQ. Nesta configuração, são incluídos mais dois transmissores e receptores, totalizando 6 TXs e 6 RXs. Com esta inclusão, a capacidade máxima da rede foi expandida para 60 Gbps.

O Gráfico 6 apresenta o atraso *downstream* para a nova configuração do OLT. De modo geral, observam-se as mesmas características entre os desempenhos dos algoritmos sob cargas médias e baixas. Nota-se que os mecanismos presentes no algoritmo HGS-PQ ainda levam vantagem no agendamento do tráfego *downstream* quando comparado com a abordagem definida pelo BEDF.

Por se tratar de um cenário com maior capacidade de transmissão e, conseqüentemente maior volume de dados, comparado à configuração anterior, verifica-se que todos os algoritmos tiveram uma perda de eficiência no agendamento sob altas cargas. Nesta configuração, como a quantidade de *frames* que chegam ao OLT em um determinado intervalo de tempo é maior, mais *frames* são armazenados nas VOQs e, conseqüentemente, maior é o atraso de enfileiramento.

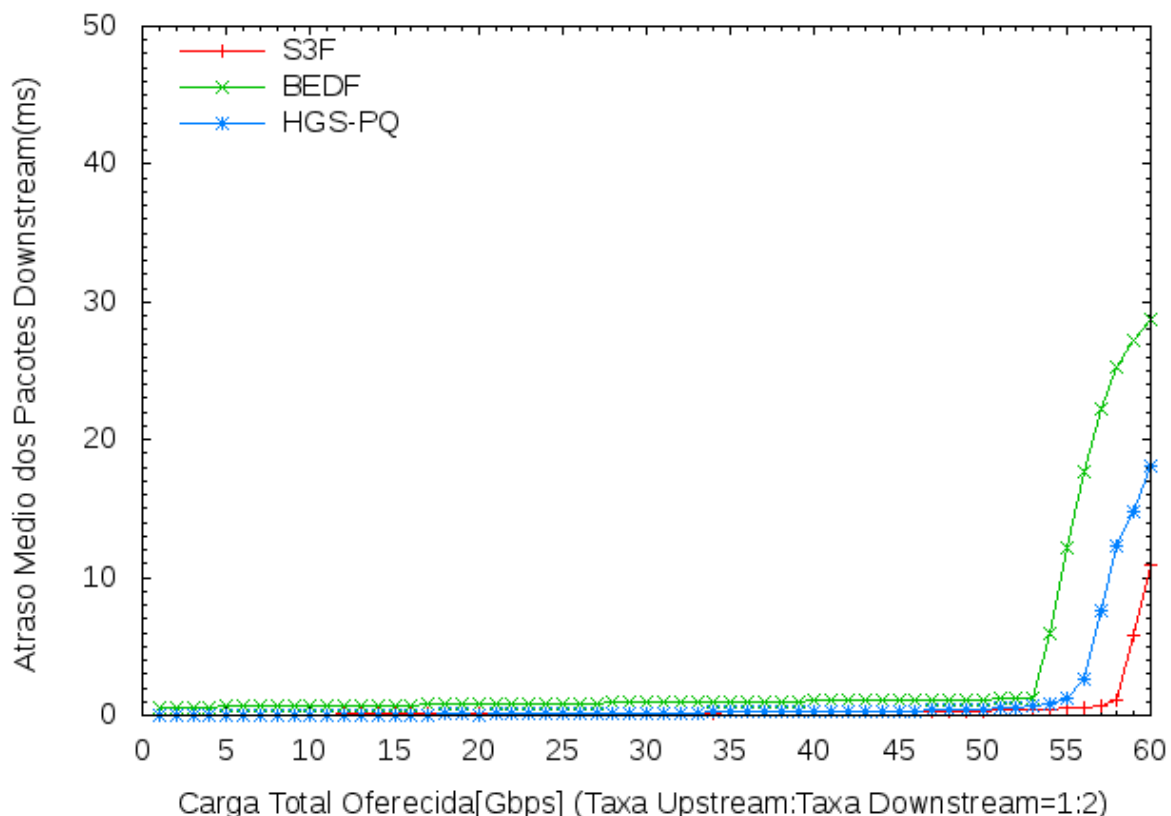


Gráfico 6 – Atraso Médio Downstream x Carga Total para 6TX/6RX.

A mesma situação ocorre com o tráfego *upstream* apresentado no Gráfico 7. Sob altas cargas, as requisições originadas pelas ONUs através das mensagens de REPORT são mais altas do que as requisições geradas na configuração anterior. Através do método LIMITED implementado no algoritmo HGS-PQ, são concedidos *grants* maiores às ONUs o que implica também no aumento dos atrasos de transmissão.

Os atrasos do algoritmo HGS-PQ e S<sup>3</sup>F mantiveram-se semelhantes até aproximadamente a carga de 50 Gbps (83% da capacidade total), momento em que começaram a diferir em função do método sequencial utilizado pelo S<sup>3</sup>F focar apenas na

eficiência do agendamento. Já o desempenho do algoritmo BEDF permaneceu o mesmo em função do *Batch Period* sempre estabelecer atrasos fixos.

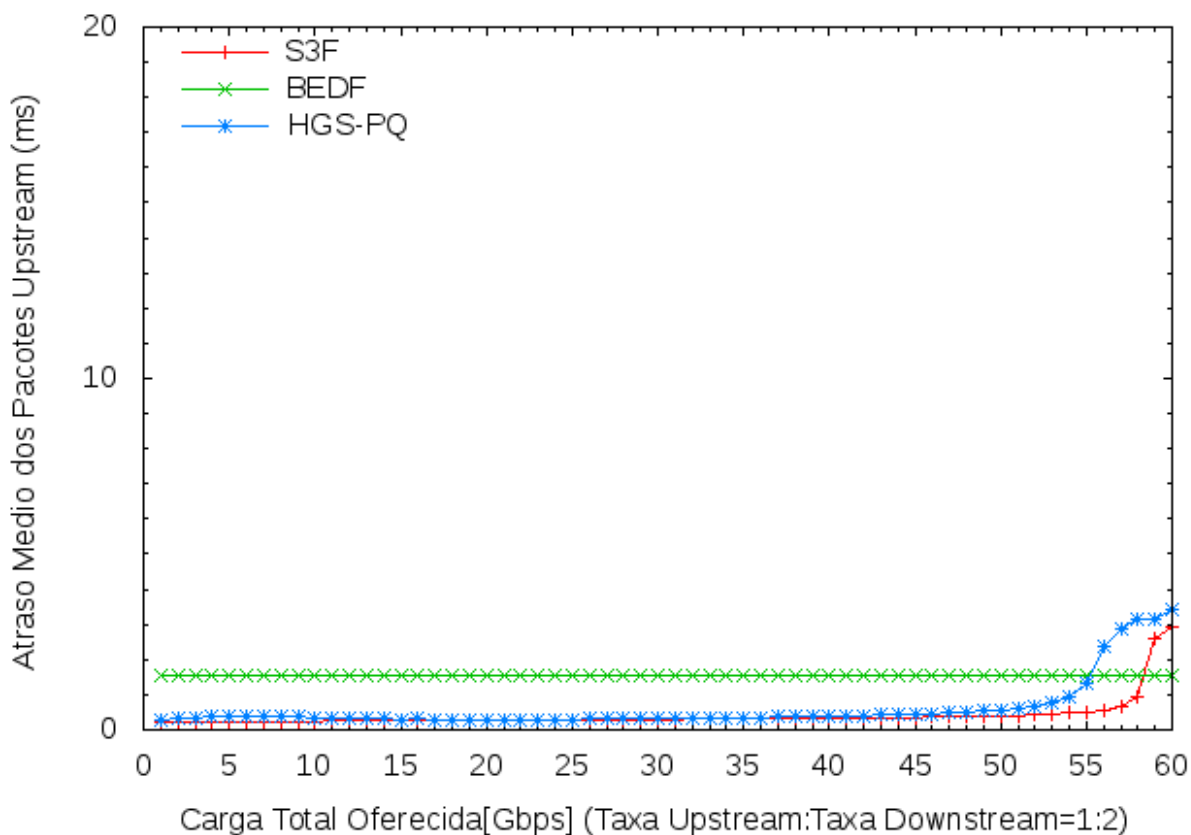


Gráfico 7 – Atraso Médio Upstream x Carga Total para 6TX/6RX

Através da análise da média dos atrasos *downstream* e *upstream* apresentados no Gráfico 8, observa-se que com a inclusão de novos recursos no OLT, além de aumentar a capacidade de transmissão da rede, há uma redução dos valores máximos dos atrasos verificados sob altas cargas. Como o algoritmo HGS-PQ utiliza a disponibilidade de recursos para agendamento conjunto das requisições, quanto maior a quantidade de transmissores e receptores mais eficiente torna-se o agendamento e menores são os atrasos.

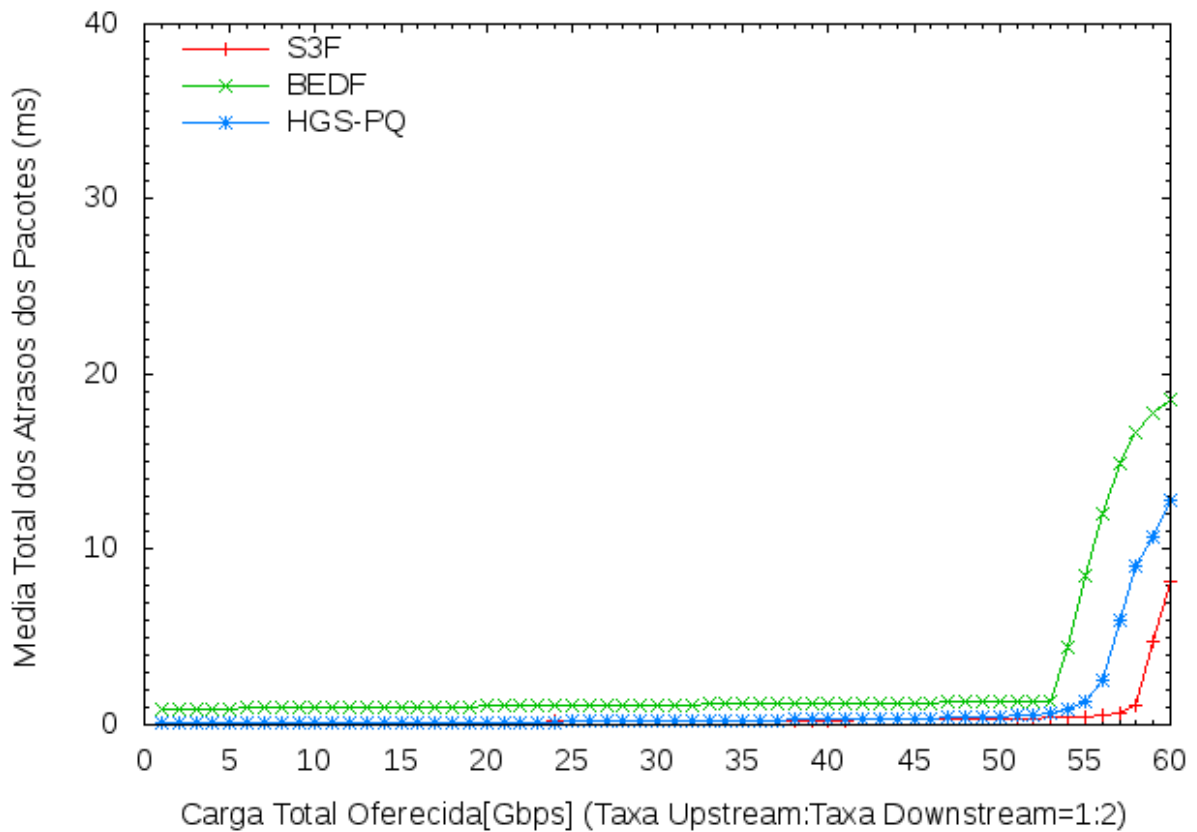


Gráfico 8 – Atraso Médio Total x Carga Total para 6TX/6RX

O gráfico 9 demonstra a ligeira queda de desempenho dos algoritmos na utilização dos canais. O aumento da capacidade de transmissão da rede, bem como o grande volume de dados a serem agendados demandou mais tempo no agendamento, refletindo na métrica de vazão. O algoritmo HGS-PQ atingiu o índice de 93% de utilização, índice que continuou superior ao algoritmo BEDF.

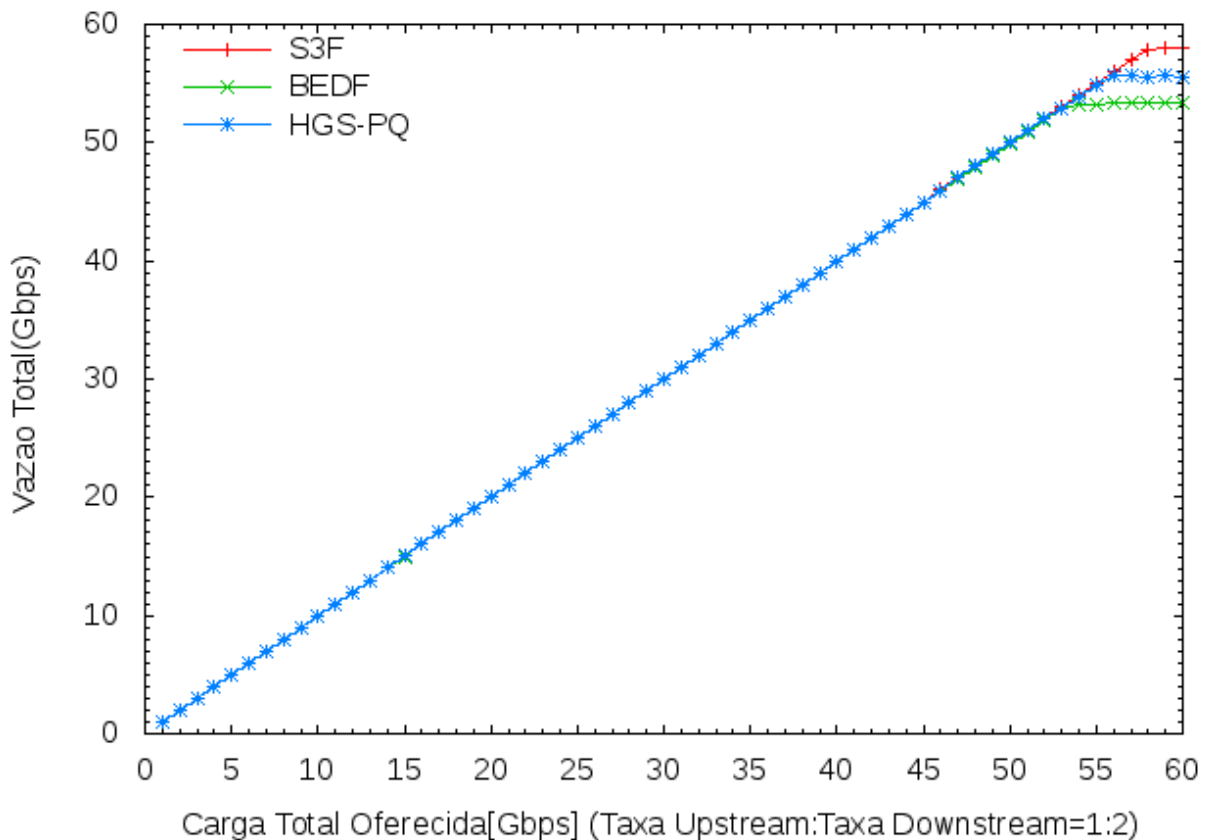


Gráfico 9 – Vazão Total x Carga Total para 6TX/6RX

#### 5.3.4.2 Cenário 2: Long-Reach SUCCESS-HPON: 100 km de área de abrangência.

Um dos tópicos que vem ganhando bastante destaque com a utilização do WDM nas redes de acesso é a pesquisa das redes de longa distância, ou *Long Reach* PONs (LR-PONs). Este cenário tem como objetivo investigar o impacto dos grandes RTTs entre OLT e ONUs no desempenho do algoritmo HGS-PQ através da distribuição de ONUs em longas distâncias, conforme descrito na seção 5.3.1, sobre a arquitetura SUCCESS-HPON. A configuração do OLT para esta análise consiste em 6 TXs e 6 RXs.

O Gráfico 10 apresenta os resultados dos atrasos *downstream* verificados pelos algoritmos. Observa-se que os altos RTT influenciaram principalmente nos algoritmos HGS-PQ e S<sup>3</sup>F onde, em grande parte das cargas avaliadas, obtiveram atrasos maiores comparados ao BEDF. Como ambos os algoritmos contemplam o tráfego *downstream* com *grants* de

transmissão, a variável MAX\_GRANT dos *grants* utilizada para concessões interferiu no desempenho dos algoritmos.

Os *grants* concedidos para ONUs mais distantes demoram mais tempo para atingir o seu destino, enquanto isto, outros frames vão sendo recebidos e armazenados nas VOQs *downstream* do OLT. Em função disto, o tamanho de *grants* considerado ideal para o cenário de 20 km, 5 Mbits, não está sendo capaz de reduzir os atrasos de enfileiramento com a mesma eficiência, o que justifica os maiores atrasos.

Sob altas cargas, conforme verificado nos cenário e configurações anteriores, o *batch period* do algoritmo BEDF continua adicionando grandes atrasos às transmissões *downstream*.

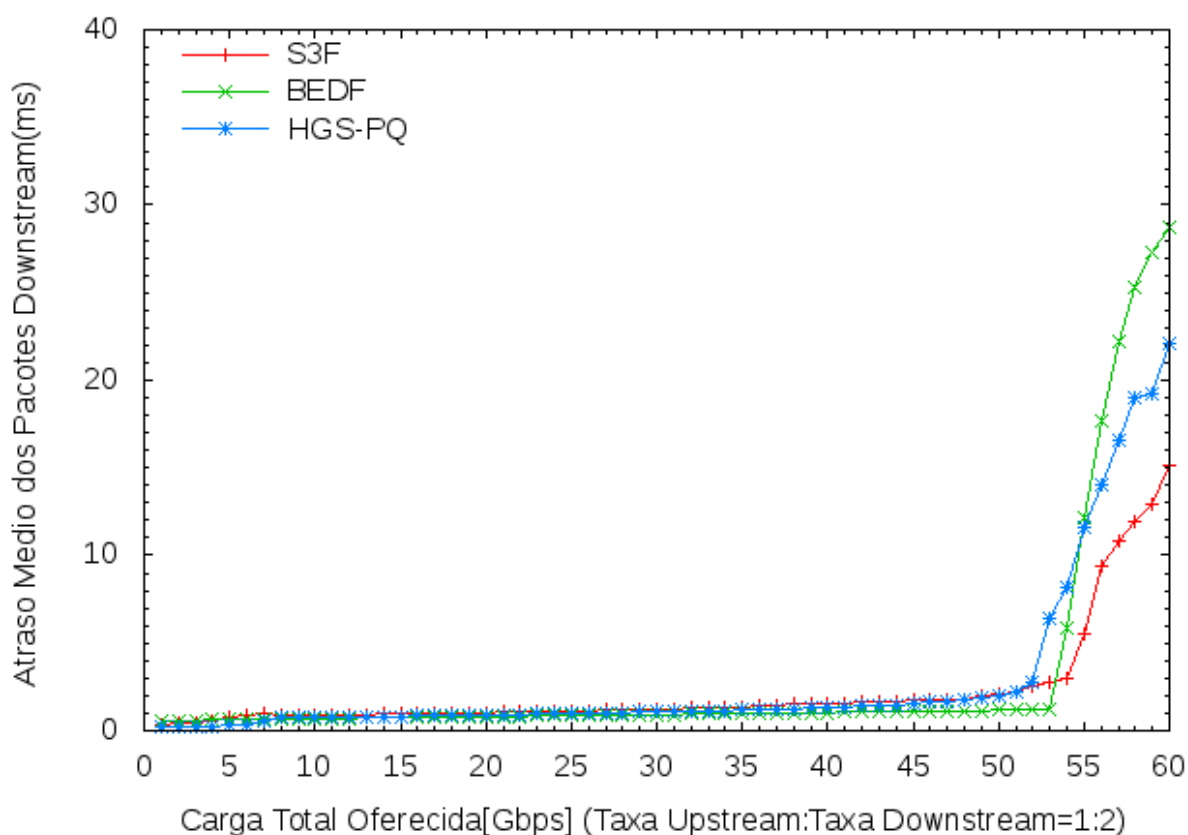


Gráfico 10 – Atraso Médio Upstream x Carga Total para 6TX/6RX - LR

O problema do MAX\_GRANT mencionado anteriormente também influencia as transmissões *upstream*. Através do Gráfico 11 verifica-se que o comportamento do algoritmo HGS-PQ é bastante semelhante ao do algoritmo S<sup>3</sup>F somente diferenciando-se sob altas cargas em função de utilizar a política LQF para selecionar e priorizar as requisições com as maiores VOQs *downstream*, o que demanda maior tempo.

Através do gráfico verifica-se também que o tempo mínimo necessário para agendamento *upstream* manteve sua média acima de 1 ms, média mais alta quando comparada ao cenário anterior. Já o algoritmo BEDF manteve a mesma característica apresentando tempo constante.

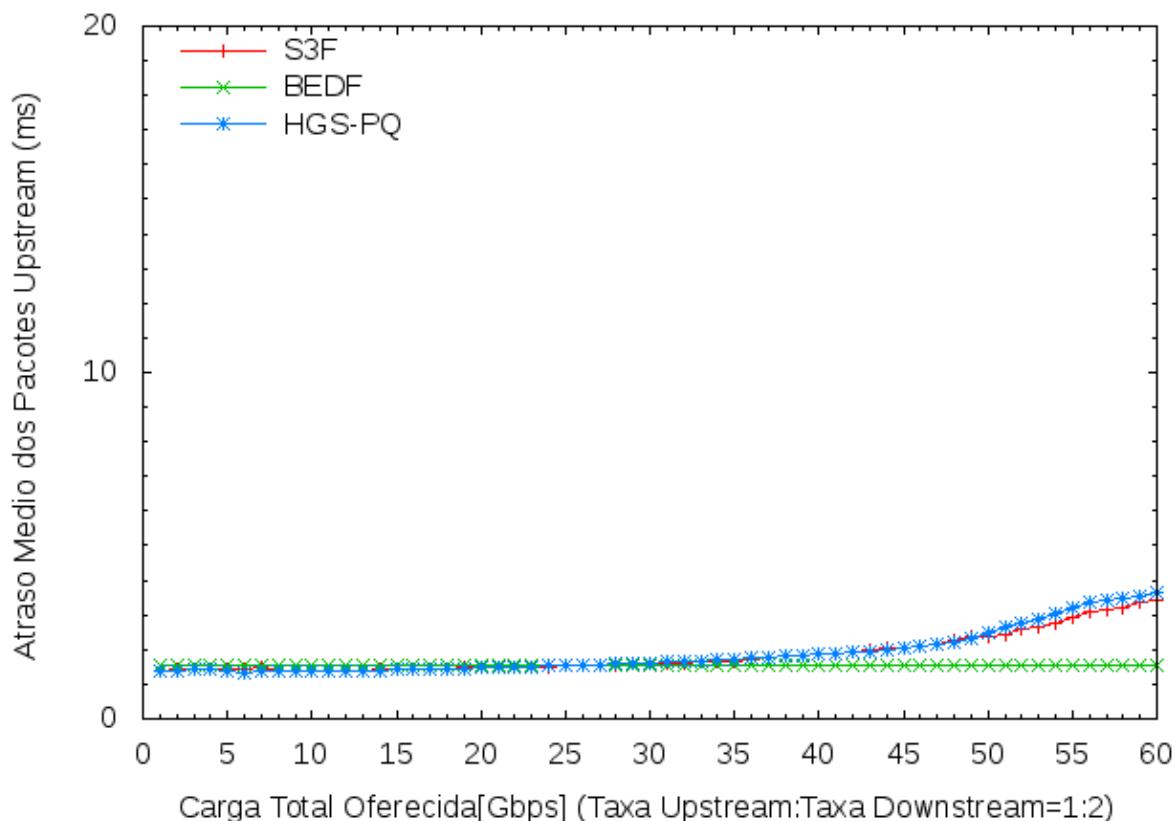


Gráfico 11 – Atraso Médio Upstream x Carga Total para 6TX/6RX - LR

A média do atraso total é verificada no Gráfico 12. Como mencionado anteriormente, o tamanho utilizado para a variável MAX\_GRANT, considerado ideal para o cenário com área de abrangência de 20 km, interferiu negativamente na média dos atrasos verificados nos algoritmos HGS-PQ e S<sup>3</sup>F.

Simplesmente solucionar este problema através do aumento do tamanho dos *grants* também adiciona atrasos de transmissão no agendamento. Em função disto, torna-se necessária a realização de uma análise para definição do “melhor” tamanho de *grants* a serem concedidos em cenário de longo alcance para a arquitetura SUCCESS-HPON.



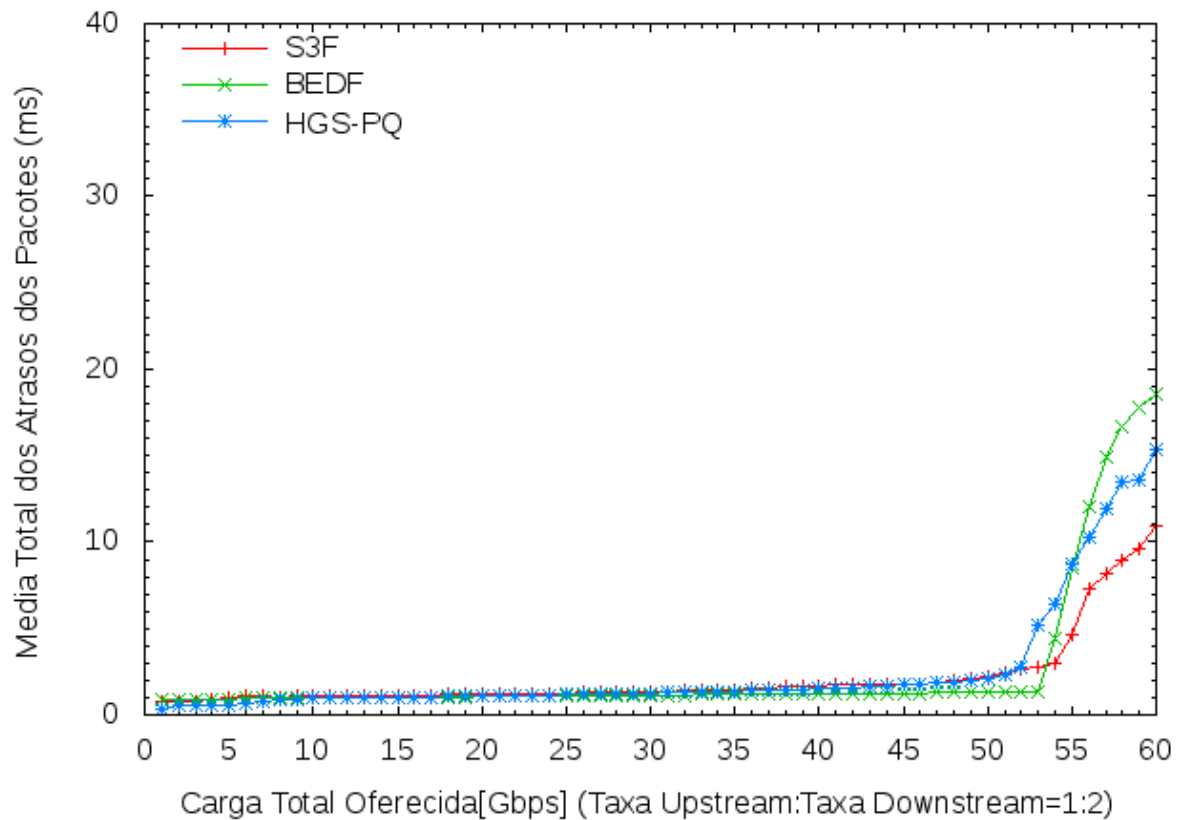


Gráfico 12 – Atraso Total x Carga Total para 6TX/6RX - LR

Os longos atrasos de propagação de ONUs distribuídas em longas distâncias e o problema referente ao tamanho dos *grants* refletiram nos resultados obtidos através da métrica de vazão para o algoritmo proposto.

O índice da vazão verificado para o algoritmo HGS-PQ foi de 90% neste cenário de longa distância, 3% menor quando comparado ao cenário anterior. Através do Gráfico 13 verifica-se que o algoritmo proposto obteve desempenho superior, porém bastante próximo ao BEDF.

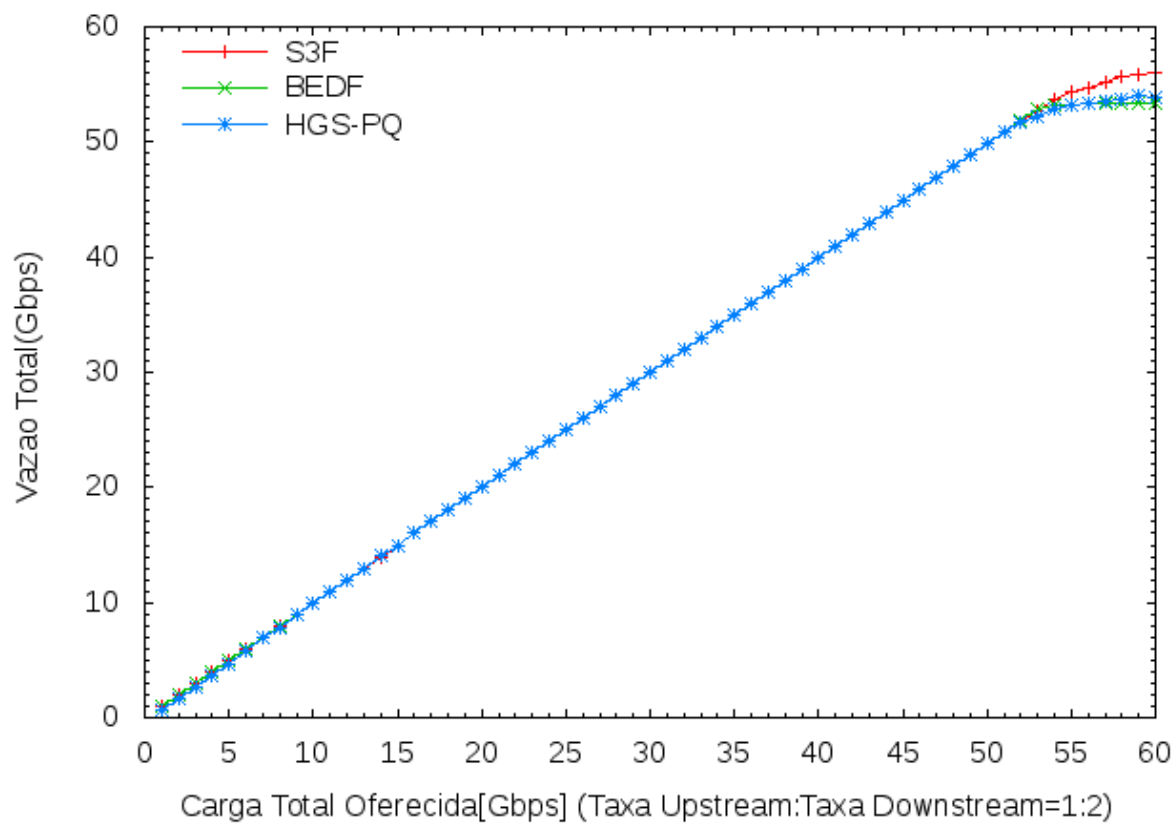


Gráfico 13 – Vazão Total x Carga Total para 6TX/6RX – LR

## 6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSÕES GERAIS

A fibra óptica certamente é a melhor solução para o problema do gargalo nas redes de acesso, e as redes ópticas passivas consolidam-se como uma solução viável para a grande demanda por largura de banda nestas redes, apresentando crescimento acelerado e diferenciando-se no mercado das telecomunicações. A integração das PONs com a tecnologia WDM propicia melhorias significativas em termos de largura de banda, escalabilidade e área de abrangência, vantagens que impulsionam a evolução e a migração das TDM-PONs tradicionais para tecnologias de próxima geração capazes de atender os requisitos dos serviços atuais e futuros além de suportar o contínuo crescimento da quantidade de usuários.

O gerenciamento dos recursos em WDM-PONs impõe desafios no desenvolvimento de um plano de controle eficiente e inteligente capaz de garantir bons desempenhos e otimização. Algoritmos de agendamento que utilizam abordagem *online* focam na eficiência da alocação dos tráfegos enquanto os que utilizam abordagem *offline* garantem controle ao OLT no atendimento das requisições, o que leva a crer que uma abordagem híbrida seria interessante para um gerenciamento eficaz e eficiente.

Nesta dissertação foi apresentada a proposta de um algoritmo de alocação dinâmica de banda que além de ser capaz de gerenciar todos os recursos da arquitetura WDM-PONs também realizasse o agendamento de seus *frames* de forma híbrida, buscando o equilíbrio entre eficiência e controle na alocação dos tráfegos, fornecendo espaço para otimização através de políticas de agendamento, garantia de justiça entre os tráfegos, redução de atrasos e bons desempenhos na utilização de canais.

Para atingir os objetivos propostos, foi necessário realizar uma pesquisa abrangente sobre tecnologias de próxima geração para redes de acesso, principais desafios de pesquisas em WDM-PONs, teorias de agendamento e principais abordagens para gerenciamento dinâmico de recursos em ambientes multicanais. Todo este levantamento bibliográfico culminou no desenvolvimento de um algoritmo híbrido de agendamento de *grants* baseado na priorização de filas, o HGS-PQ, que utiliza um *framework online just-in-*

*time* baseado na disponibilidade de canais e de recursos no OLT para selecionar um conjunto de requisições e agendá-las através de um critério de priorização estabelecido em políticas de agendamento.

Para análise do algoritmo HGS-PQ, foi utilizada a política LQF nas simulações com o intuito de minimizar os atrasos na rede, mas fica claro que, dependendo do problema a ser abordado e do cenário a ser simulado, diversas políticas de agendamento podem ser avaliadas com base neste algoritmo.

Através de simulações realizadas em ambiente computacional e da análise comparativa com os demais algoritmos desenvolvidos para a arquitetura adotada, constatou-se que o algoritmo proposto, além de prover espaço para otimização de forma eficiente, apresentou baixos atrasos e bons desempenhos na utilização dos canais. Verificou-se que, com a utilização do *framework online just-in-time* pelo algoritmo HGS-PQ, os atrasos de processamento da política LQF não interferiram drasticamente no agendamento *upstream*, enquanto que a concessão de *grants* para o tráfego *downstream* contribuiu para o agendamento justo entre os tráfegos.

Com base nos fatos e nos resultados apresentados conclui-se que o algoritmo proposto mostrou-se viável para utilização na arquitetura SUCCESS-HPON, proporcionando gerenciamento pleno de todos os recursos da rede e oferecendo controle ao OLT no agendamento dos tráfegos. Estudos adicionais que focam na redução dos atrasos em cenários de longa distância contribuirão para a melhoria do algoritmo.

## 6.2 TRABALHOS FUTUROS

A proposta do algoritmo HGS-PQ pode apresentar melhorias relacionadas às políticas de agendamento e aos parâmetros utilizados nesta dissertação. Como mencionado anteriormente, o algoritmo apresentou atrasos mais altos que os verificados pelo algoritmo BEDF no agendamento dos *frames* no cenário de longa distância. Estudos relacionados à otimização do tamanho do *grant*, a fim de solucionar este problema, bem como a utilização de outras políticas de agendamento, como SPT, LFJ, SPT, entre outras, seriam pertinentes.

O algoritmo proposto foi analisado sob a arquitetura SUCCESS-HPON, que possui uma abordagem de comprimentos de onda dedicados e ONUs sem fonte óptica. As

arquiteturas WDM-PONs propostas na literatura apresentam características específicas que se diferenciam das demais, obrigando o desenvolvimento de algoritmos de agendamento únicos que são capazes de gerenciar todos os seus recursos. Sugere-se também a análise do algoritmo HGS-PQ sob outras arquiteturas WDM-PON nas quais possa ser investigado o impacto da alocação *upstream* em múltiplos canais compartilhados.

Nesta dissertação foi realizada uma análise comparativa do algoritmo proposto com os demais algoritmos desenvolvidos para a arquitetura adotada. Esta análise foi focada no desempenho do agendamento de cada um dos algoritmos, não considerando a modelagem de tráfegos específicos ou serviços. Neste sentido, sugere-se que estudos detalhados considerem tráfegos reais de aplicações a fim de avaliar o impacto fim a fim do algoritmo HGS-PQ na entrega dos serviços aos usuários, bem como a integração deste com demais planos de controle do *core* da rede.

## REFERÊNCIAS

ABRAMS, M; BECKER, P; FUJIMOTO, Y; O'BYRNE, V; PIEHLER, D. FTTP Deployments in the United States and Japan-Equipment Choices and Services Provider Imperatives, **Journal of Lightwave Technologies**, Vol. 23, Nº 1, pp 236-246, Jan 2005.

AN, F; KIM, K.; GUTIERREZ et al. A Next-Generation Optical Access Architecture for Smooth Migration from TDM-PON to WDM-PON. **IEEE Commun. Mag.**, vol. 43, no. 11, pp. S40–S47. 2005

AN, F; KIM, K.; GUTIERREZ et al. SUCCESS: a next-generation hybrid WDM/TDM optical access network architecture, **IEEE/OSA JLT** 11, 2557-2569. 2004

ARBIETO, C. Alocação Dinâmica de Largura de Banda em Redes EPON. **Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP**, 2007.

BANERJEE A. et al. Wavelength-division multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access—A review [Invited]. **OSA J. Opt. Netw.—Special Issue Optical Access Networks**, vol. 4, no. 11, pp. 737–758, Nov. 2005.

CLARKE, F.; SARKAR, S.; MUKHERJEE, B. Simultaneous and interleaved polling: an upstream protocol for WDM-PON. **Proceedings of Optical Fiber Communication Conference**, p. 3, March 2006.

DEVENTER, M.; ANGELOPOULOS, J. ; BISMA,H. et al. Architecture for 100 km 2048 split bidirectional SuperPONs from ACTS-PLANET, **Proc., SPIE**, vol. 2919, pp. 245-251, Nov. 1996.

EVANS, D; MANNING, J. **FTTH Council Europe's First Ever Study Proves Positive Impact on Sustainable Development through FTTH Networks**. Cohesive Communications. Fev, 2008. Disponível em: <[http://www.ftthcouncil.eu/documents/press\\_release/FTTH%20Council%20SUDEFIB%20-%20FINAL.pdf](http://www.ftthcouncil.eu/documents/press_release/FTTH%20Council%20SUDEFIB%20-%20FINAL.pdf)>. Acesso em Agosto de 2010.

FRIGO, N.; IANNONE, P.; MAGILL, P.; DARCE, T. et al. A wavelength-division multiplexed passive optical network with cost-shared components. **IEEE Photon. Technol. Lett.** 6, 1365—1367, 1994.

FROST & SULLIVAN. WDM-PON: How Long is it Going to Take?. Nov, 2009. Disponível em: <<http://www.frost.com/prod/servlet/market-insight-top.pag?docid=184986442>>. Acesso em Setembro de 2010.

GRAHAM, R. Bounds for certain multiprocessing anomalies. **Bell System Technical Journal**, vol. 45, pp. 1563–1581, 1966.

HERON, R.; STORRY, C.; PATEL, S. Future Directions in Fiber Access Networks. Proceedings NOC, Valladolid (Spain). 2009

IEEE 802.3ah. **Ethernet in the First Mile Task Force**. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/3/efm/index.html>>. Acesso em Setembro de 2010.

ITU-T G.983.x. **The leader on BPON standards**. Disponível em: <<http://www.itu.int/itudoc/gs/promo/tsb/83121>>. Acesso em Setembro de 2010.

ITU-T G.984.x. **The leader on GPON standards**. Disponível em: <<http://www.itu.int/itudoc/gs/promo/tsb/85155>>. Acesso em Setembro de 2010.

JAIN, R. **The Art of Computer Systems Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling**. USA: John Wiley & Sons, abr. 1991. 720 p.

KEISER, G. **Optical Fiber Communications**, McGraw-Hill, 2000.

KERNER, S. Global Networking Bandwidth Demand Starts to Slow. **Enterprise Networking Planet**. Junho de 2010. Disponível em: <<http://www.enterprisenetworkingplanet.com/news/article.php/3885571/Global-Networking-Bandwidth-Demand-Starts-to-Slow.htm>> .Acesso em Novembro de 2010

KIM, K.; GUTIERREZ, D.; AN, F.; KAZOVSKY, L. Batch Scheduling Algorithm for SUCCESS WDM-PON architecture, **IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology**, Nov. 2004.

KIM, K.; GUTIERREZ, D.; AN, F; KAZOVSKY, L. Design and performance analysis of scheduling algorithms for WDM-PON under SUCCESS-HPON architecture, **IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology**, Nov. 2005.

KRAMER, G. **Ethernet Passive Optical Networks**. McGraw-Hill, 2005.

KRAMER, G.; MUKHERJEE, B.; PASAVENTO, G. Ethernet PON (EPON): Design and Analysis of an Optical Access Network. **Photonic Network Communications**, vol. 3, N° 3, pp. 307-319, julho 2001

KWONG, K.; HARLE, D.; ANDONOVIC, I. Dynamic bandwidth allocation algorithm for differentiated services over WDM EPONs. **Proceedings of The Ninth International Conference on Communications Systems**, pp. 116–120, September 2004

LAZARO, A; MARTINEZ, I; POLO, V. et al. Hybrid Dual-fiber-Ring with Single-fiber-Trees Dense Access Network Architecture using RSOA-ONU," **Proc. IEEE/OSA Optical Fiber Communication Conference (OFC'07)**, Mar. 2007.

LUO, Y.; YIN S.; ANSARI, N; WANG, T. Resource management for broadband access over time-division multiplexed passive optical networks. **IEEE Network**, vol. 21, no. 5, pp. 20–27, Sep-Oct 2007.

MAIER, M ; HERZOG, M, ; STARGATE: The Next Evolutionary Step toward Unleashing the Potential of WDM EPONs. **IEEE Communications Magazine**, vol. 45, no. 5, pp. 50-56, May 2007.

MCGARRY, M. An evolutionary wavelength division multiplexing upgrade for Ethernet passive optical networks. **Master's thesis**, Arizona State University, 2004.

MCGARRY, M; REISSLEIN, M; C; MAIER, M. Bandwidth Management for WDM-EPONs. **IEEE/OSA Journal of Optical Networking**, vol. 5, no. 9, Set 2006

MCGARRY, M; REISSLEIN, M; COLBOURN, C; MAIER, M; AURZADA, F; SCHEUTZOW, M. Just-in-Time Scheduling for Multichannel EPONs. **IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology**, vol. 26, no. 10, May 2008

MAKINO, T; LI, G. ; SARANGAN, A.; HUANG, W. Multiwavelength gain-coupled MQW DFB laser array with fine tunability. **Optical Fiber Communication Conference**, Vol. 2 of OSA Technical Digest Series (Optical Society of America), paper FB1, 1996.

MENG, Y; JIANG,T; XIAO,D. Analysis and Solutions of Security Issue in Ethernet PON. **Proceedings of SPIE**, Vol. 5626, 2005.

MUKHERJEE, B. Optical WDM Networks, Springer, Feb. 2006.

PARK, S.; LEE, C; JEONG, K; PARK, H; AHN, J; SONG, K. Fiber-to-the-Home Services Based on Wavelength-Division-Multiplexing Passive Optical Network. **IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology**, Vol 22, 2004.

PINEDO, M. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems, 2nd ed. Prentice-Hall, 2002.

RITTER, Michael. MEF-Metro Ethernet Forum. Ethernet over WDM-PON. 2010

SHEA, D. ; MITCHELL, J. A 10 Gb/s 1024-Way Split 100-km Long Reach Optical Access Network, **Journal of Lightwave Technology**, vol. 25, no. 3, pp. 685-693, Mar. 2007

SILVA, G. Estudo de Topologias para Redes WDM-PONs. **Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP**, 2010.

SONG, H.; KIM, B-W; MUKHERJEE, B. Long-Reach Optical Access Networks: A Survey of Research Challenges, Demonstrations, and Bandwidth Assignment Mechanisms, **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, vol. 12, no. 1, pp. 112-123, 2010

SUZUKI, K; FUKADA, Y.; NESSET, D; DAVEY, R. Amplified gigabit PON systems. **Journal of Optical Networking**, vol. 6, no. 5, pp. 422-433, May 2007.

TALLI, G.; CHOW, C.; TOWNSEND, P. et al. Integrated Metro and Access Network: PIEMAN. Proc., **12th European Conf. Networks and Opt. Commun.**, Kista, Sweden, June 2007.

TALLI, G. ; TOWNSEND, P. Hybrid DWDM-TDM Long-Reach PON for Next-Generation Optical Access. **Journal of Lightwave Technology**, vol. 24, no. 7, pp. 2827-2834, July 2006.

TAKEUTI, P. Projeto e Dimensionamento de redes ópticas passivas (PONs). **Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP**, 2005.

THOMPSON, K; MILLER, G; WILDER, R. Wide-Area Internet Traffic Patterns and Characteristics. **IEEE Network**, vol. 11, pp. 10–23, Dec 1997.

VARGA, A. OMNeT++: Discrete event simulation system, **Technical University of Budapest**, version 2.3, June 2003.



VOORDE, I; MARTIN, C.; VANDEWEGE, J.; QIU, X. The superPON demonstrator: an exploration of possible evolution paths for optical access networks. IEEE Communication Magazine, vol. 38, no. 2, pp. 74-82, Feb. 2000.

WDM-E-PON (WE-PON),” Working Documents, ETRI, 2007

ZIRNGIBL, M.; JOYNER, C.; STULZ, L.; DRAGONE, C. et al. LARNET, a local access router network. IEEE Photon. Technol. Lett. 7, 215-217,1995.

## **ANEXOS**

## ANEXO A – ARQUIVO OMNETPP.INI COM OS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Este é o arquivo omnetpp.ini utilizado para definir todos os parâmetros utilizados nas simulações.

```
[General]
ini-warnings = yes
network = testSuccess
num-rngs = 1
rng-class = "cMersenneTwister"
##seed-0-mt = 1768507984
sim-time-limit = 120s      ; should be large enough to guarantee 'numPktsLimit' criterion
total-stack-kb = 2048      ; [bit], increase if necessary
```

```
[Cmdenv]
express-mode = yes
module-messages = yes
event-banners = yes
message-trace = no
status-frequency = 1000000
#status-frequency = 10000
performance-display = yes
extra-stack = 16384        ; default value
```

```
[Tkenv]
default-run=1
use-mainwindow = yes
print-banners = yes
breakpoints-enabled = yes
update-freq-fast = 10
update-freq-express = 500
```

```
[DisplayStrings]
**.IpPktGenerator = "i=gen"
**.IpPktSink =      "i=sink"
```

```
[Parameters]
### Topology
**.numOnus = 16
**.numUsersPerOnu = 1
**.maxAddress = 15
**.distances="5 5 5 10 10 10 10 15 15 15 15 20 20 20 20"
###**.distances="5 5 5 5 25 25 50 50 50 50 85 85 100 100 100 100"

### MAC control parameters
**.cwMax = 5e6          ; maximum CW in bits
```

```

**.onuTimeout = 1ms                ; maximum polling cycle from OLT to ONU
**.maxTxDelay = 2ms                ; maximum TX scheduling delay for grants
**.batchPeriod = 1e-3              ; period for batch scheduling (default 1e-3)

### OLT
**.olt.ippktgenerator.address =    100
**.olt.ippktsink.address =         100
**.olt.scheduler.queueSize =       8e7                ; 80 Mbits - used in seq. scheduling
**.olt.scheduler.queueSizePoll =   8e7                ; 80 Mbits - used for polling frames
**.olt.scheduler.rsDepth =         0
**.olt.scheduler.voqSize =         8e7                ; 80 Mbits (10 Mbytes) - used for seq2 & batch
scheduling (per stream)
**.olt.scheduler.voqThreshold =    0.7                ; used in EdfWithLqf scheduler.

### OLT scheduling algos. & operation modes
## - Sequential
## - HGS
## - S3F
## - EarliestDepartureFirst
**.olt.schType = "HGS"

### ONUs
**.onu[*].queueSize = 8e7 ; 80 Mbits (10 Mbytes)

### Monitor
###*.numPktsLimit = 1e5           ; # of packets per run - alternative termination criterion
**.numPktsLimit = 1e7

[OutVectors]
**.interval = ""
#.interval = 1s..2s
**.enabled = no                   ; Disable collection of output vectors (default)

### For batch run of simulation
include run.ini                   ; paramters for each run
include parameters.ini           ;

[Run 1]
**.numTransmitters = 6
**.numReceivers = 6
**.cwMax = 5e6
**.onuTimeout = 2e-3
**.olt.ippktgenerator.dataRate = 26666.66666666667
**.onu[*].ippktgenerator[0].dataRate = 833.3333333333333
###*.olt.ippktgenerator.dataRate = 0
###*.onu[*].ippktgenerator[0].dataRate = 1

```