

HGS-PQ: UM ALGORITMO HÍBRIDO DE AGENDAMENTO DE GRANTS BASEADO NA PRIORIZAÇÃO DE FILAS PARA WDM-PONs

João Gabriel E. Aleixo, Vagner de B. Nascimento, Billy A. Pinheiro, Eduardo Cerqueira, Antônio J. G. Abelém

Grupo de Estudo em Redes de Computadores e Comunicação Multimídia (GERCOM)
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) Instituto Tecnológico
(ITEC) Universidade Federal do Pará (UFPA)

Caixa Postal 479 – 66.075-110 – Belém – PA – Brasil

{jgabriel,vagner,billy,cerqueira,abelem}@ufpa.br

Abstract. *The Wavelength-Division Multiplexing Passive Optical Networks (WDM-PONs) appear as a result of the evolution of the passive optical technologies and offer support to the next generation services, improving the Time-Division Multiplexing PONs performance parameters and increasing the coverage area of these networks. This paper presents the proposal of a hybrid grant scheduling algorithm based on priority queuing (HGS-PQ), which aims to manage all the WDM-PONs resources and offers efficiency and control to the Optical Line Terminal (OLT) in the dynamic traffic scheduling. Simulation results were carried out by using OMNET++, where delay and throughput metrics were analyzed to show the impact and benefits of the proposed solution in the SUCCESS-HPON architecture.*

Resumo. *As WDM-PONs surgem como consequência da evolução das tecnologias ópticas passivas e oferecem suportes aos serviços de próxima geração, melhorando os parâmetros de desempenho das TDM-PONs e aumentando a área de cobertura destas redes. Este artigo apresenta a proposta de um algoritmo híbrido de agendamento de grants baseado na priorização de filas (Hybrid Grant Scheduler based on Priority Queueing – HGS-PQ), que busca gerenciar todos os recursos de arquiteturas WDM-PONs e oferecer eficiência e controle ao Optical Line Terminal (OLT) no agendamento dinâmico dos tráfegos. Os resultados apresentados foram extraídos de cenários desenvolvidos no ambiente de simulação computacional OMNET++, e são referentes às métricas de atraso e vazão para avaliar o desempenho do algoritmo proposto na arquitetura SUCCESS-HPON.*

1. Introdução

As redes de acesso conectam os assinantes residenciais e corporativos ao *Central Office* (CO) das empresas de telecomunicações. A demanda por largura de banda nestas redes tem crescido 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 infraestrutura 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 (*Wireless Fidelity*) 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 et al., 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.

As redes ópticas passivas (PONs) 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 aos 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 *upstream*.

No entanto, verifica-se que uma abordagem híbrida, entre as propostas *online* e *offline*, pode trazer vantagens tanto no gerenciamento quanto no controle do tráfego dentro do OLT, otimizando a alocação dos grants e as políticas de agendamento, e com isso, proporcionando uma maior eficiência na vazão do tráfego *upstream* e *downstream*.

Neste artigo, é apresentada a proposta de um algoritmo de alocação dinâmica de banda baseado na priorização de filas (HGS-PQ) que além de ser capaz de gerenciar todos os recursos de uma arquitetura WDM-PON também realiza 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 e garantindo justeza entre os tráfegos. O algoritmo tem seu desempenho avaliado em ambiente de simulação computacional desenvolvido no OMNET++ através das métricas de vazão e atraso e é comparado com os demais algoritmos de agendamento já propostos para a arquitetura SUCCESS-HPON, adotada como cenário de testes.

O restante deste artigo está organizado nas seguintes seções: a Seção 2 discute alguns trabalhos relacionados sobre a arquitetura SUCCESS-HPON, assim como publicações relacionadas ao problema do agendamento dos tráfegos em WDM-PONs. Uma visão geral da arquitetura SUCCESS-HPON é feita na Seção 3, enquanto que o algoritmo HGS-PQ é apresentado e descrito na Seção 4. Os resultados obtidos através das simulações são analisados na Seção 5 e as considerações finais e trabalhos futuros são apresentados na Seção 6.

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 abordagem completa sobre WDM-PONs descrevendo seus principais aspectos.

Em [An et al. 2004], os autores propõem uma arquitetura híbrida WDM/TDM de rede óptica de acesso chamada Stanford University aACCESS 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. O primeiro *testbed* para a arquitetura proposta pela Universidade de Stanford é descrito em [An et al. 2004], juntamente com resultados experimentais obtidos. Dentre os resultados, os autores comprovam a viabilidade da transmissão bidirecional no mesmo comprimento de onda e modulação, na ONU, dos dados *upstream* via ondas contínuas (*Continuous Wave* – CW) originadas pelo OLT, eliminando a necessidade de fonte óptica nas ONUs.

Em [Kim et al. 2004], os autores abordaram o problema do gerenciamento de recursos e do agendamento dos *frames* sobre a arquitetura SUCCESS-HPON. Neste artigo, é proposto um algoritmo de agendamento, baseado em seu antecessor que provê otimização através de filas virtuais (*Virtual Output Queues* - VOQs), no agendamento de mais de um *frame* através de períodos pré-definidos. Já em [Kim et al. 2005] os autores demonstraram os resultados da análise de desempenho feita para dois novos algoritmos propostos para agendamento justo e eficiente dos *frames* sobre a arquitetura SUCCESS-HPON: *Batching Earliest Departure First* (BEDF) e *Sequential Scheduling with Schedule-time Framing* (S³F). Os resultados demonstram que apesar de melhorar o desempenho do algoritmo sequencial originalmente proposto para a arquitetura, questões como QoS e priorização de *frames* ainda deveriam ser abordados.

Em [McGarry, 2006], o problema do agendamento de *grants upstream* foi abordado em WDM-PONs através do modelo de máquinas paralelas utilizando as políticas *Least Flexible Job* (LFJ) e *Shortest Processing Time* (SPT) como política de regras compostas. Os autores em [McGarry, 2008] apresentam um método eficiente de agendamento para *Ethernet Passive Optical Networks* (EPONs) multicanais baseado no *framework* de agendamento *online JIT*. No entanto, este artigo assume que os canais são idênticos e que o modelo de máquinas paralelas é utilizado para resolver o problema do agendamento, tornando sua aplicabilidade restrita.

3. Arquitetura SUCCESS-HPON

A arquitetura de rede óptica de acesso denominada *Stanford University aACCESS – 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 viabiliza o futuro

processo de evolução e expansão para a coexistência de usuários residenciais e corporativos.

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 1.

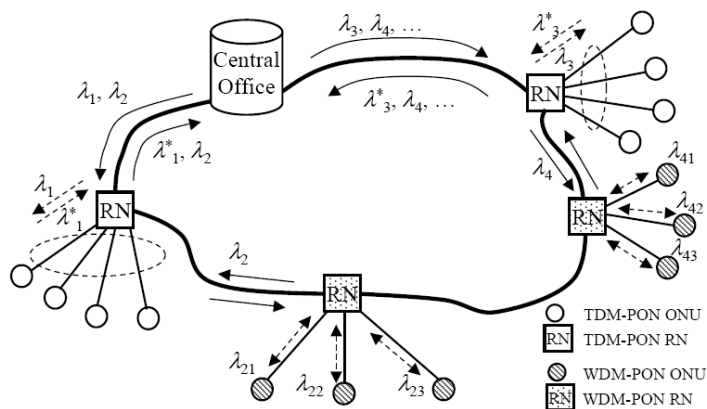


Figura 1. Arquitetura SUCCESS-HPON [An et al. 2004]

A arquitetura SUCCESS-HPON possui conexões WDM ponto a ponto entre o CO 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 haver 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 equipamentos MUX/DEMUX DWDM, como por exemplo, o AWG [An et al. 2004].

A Figura 2 apresenta o diagrama do bloco lógico para a parte WDM-PON do OLT e da ONU SUCCESS-HPON.

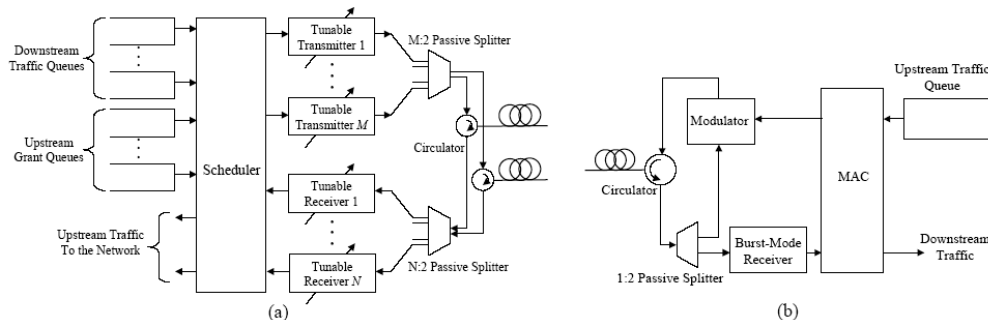


Figura 2. Diagrama do Bloco Lógico do (a) OLT e (b) ONU [An et al., 2004]

A utilização de componentes ajustáveis minimiza a quantidade de *transceivers* e do custo do sistema por serem compartilhados entre os usuários [An et al. 2004].

Quanto mais usuários ingressarem na rede, mais transmissores e receptores ajustáveis são adicionados no OLT, que é representado na Figura 2(a). 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.

A Figura 2 (b) apresenta o diagrama do bloco lógico da parte WDM-PON da ONU SUCCESS-HPON. A ONU não possui fonte óptica e, ao invés disso, 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 deve 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. Maiores detalhes sobre a arquitetura SUCCESS-HPON podem ser obtidos em [An et al. 2004].

As ONUs WDM, responsáveis por converter o sinal óptico 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., 2004], este equipamento pode ser utilizado para melhor aproveitamento da potência, quando comparado com um *splitter* passivo.

O protocolo MAC utilizado pela arquitetura SUCCESS-HPON usa o mecanismo de *polling* para checar a quantidade de tráfego *upstream* armazenado nas ONUs, onde o OLT envia *grants*, no formato de rajadas CW, para permitir que as ONUs transmitam seu tráfego *upstream*. Este protocolo emprega a sinalização *in band*, por não utilizar nenhum canal adicional para esta finalidade, e utiliza *frames* com os campos de REPORT e GRANT definidos para o mecanismo de *polling* e envio de *grants*, respectivamente. Como pode ser observado na Figura 3, 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.

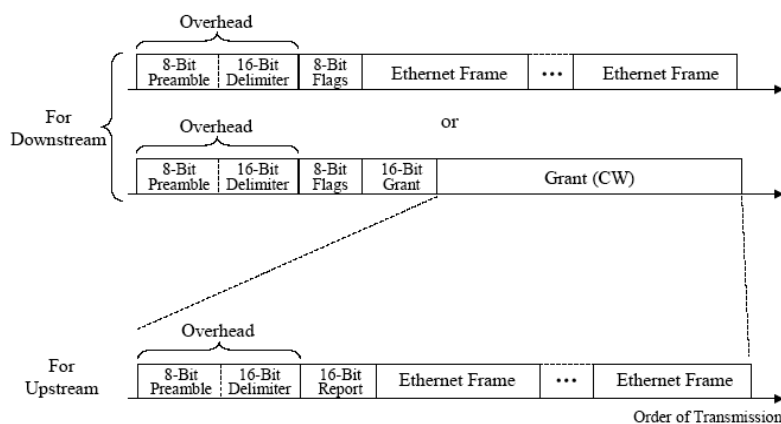


Figura 3. Formato dos Frames SUCCESS [An et al., 2004]

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 em seguida 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 excedida.

Os algoritmos *Batching Earliest Departure First* (BEDF) e *Sequential Scheduling with Schedule-Time Framing* (S³F) foram concebidos para melhorar o desempenho do algoritmo originalmente proposto para a arquitetura SUCCESS-HPON e utilizam o conceito de VOQs, uma para cada tipo de tráfego, *upstream* e *downstream*, para prover proteção entre ambos.

O principal objetivo do algoritmo BEDF é fornecer espaço para otimização ao agregar e agendar de forma conjunta as múltiplas mensagens que são recebidas durante um período de tempo pré-definido (*batch period*). Baseado no algoritmo Sequencial, porém com diferenças na abordagem utilizada para o 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.

O S³F 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* para as transmissões *downstream*, assim como no tráfego *upstream*, 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*.

Maiores detalhes sobre a operação dos algoritmos BEDF e S³F verificar em [Kim et al., 2005].

4. Proposta de Agendamento Híbrido de Grants Baseado na Priorização de Filas - HGS-PQ

A proposta de um algoritmo híbrido de agendamento de *grants* baseado na priorização de filas (*Hybrid Grant Scheduler based on Priority Queuing* - HGS-PQ) para WDM-PONs busca oferecer não somente eficiência ao OLT, mas também controle no agendamento dos tráfegos. A proposta híbrida explora a abordagem do *framework online just-in-time* [McGarry et al., 2008] para realizar o agendamento dos *grants upstream* com eficiência, sem incrementar atrasos desnecessários, ao mesmo tempo em que fornece espaço para otimização e controle 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 assim priorizar as ONUs de acordo com uma determinada política de agendamento.

O HGS-PQ também utiliza o conceito de VOQs para garantir proteção entre os tráfegos. Após o recebimento de uma mensagem de REPORT originada por uma ONU, o algoritmo verifica se todas as VOQs *upstream* localizadas no OLT estão vazias, o que representa a primeira requisição recebida e que se inicia um novo ciclo de agendamento. Em seguida, o algoritmo verifica a disponibilidade dos transmissores e receptores, reservando-os para o instante em que permanecerem livres.

O tempo de disponibilidade dos recursos (t_{disp}) 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 4 apresenta um esquema para representar este processo.

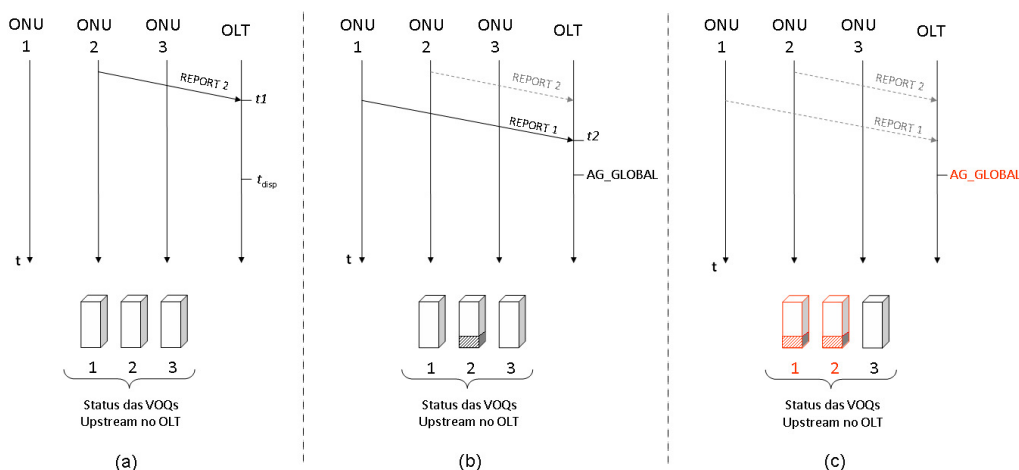


Figura 4 – Processo de definição do marco AG_GLOBAL.

Na Figura 4(a), o OLT recebe uma mensagem de REPORT originada pela ONU 2 no instante t_1 . Neste momento o HGS-PQ verifica o *status* de todas as VOQs *upstream* e constata que se trata 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 4(b) o OLT recebe, no instante t_2 , uma 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 4(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.

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.

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 primeiramente aquelas requisições que possuírem as VOQs *downstream* correspondentes com maior quantidade de dados e em seguida enviará os *grants* com tamanho preestabelecido. O método utilizado pelo algoritmo HGS-PQ para a definição do tamanho dos *grants* é denominado *LIMITED* [McGarry et al., 2006], 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 a requisição proveniente da ONU i , e G_{max} 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 S³F. 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 5 mostra a utilização da política LQF e do mecanismo de justeza utilizado pelo algoritmo HGS-PQ.

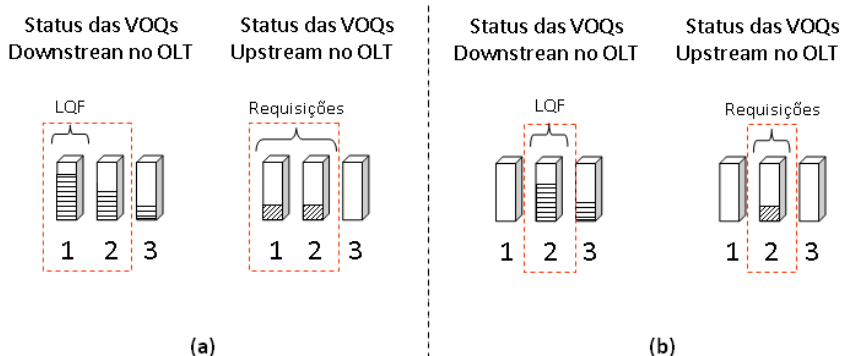


Figura 5 – Utilização da Política LQF e mecanismo de justiça entre os tráfegos

A Figura 5(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. A Figura 5(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. A operação geral do algoritmo HGS-PQ é representada através do fluxograma apresentado na Figura 6.

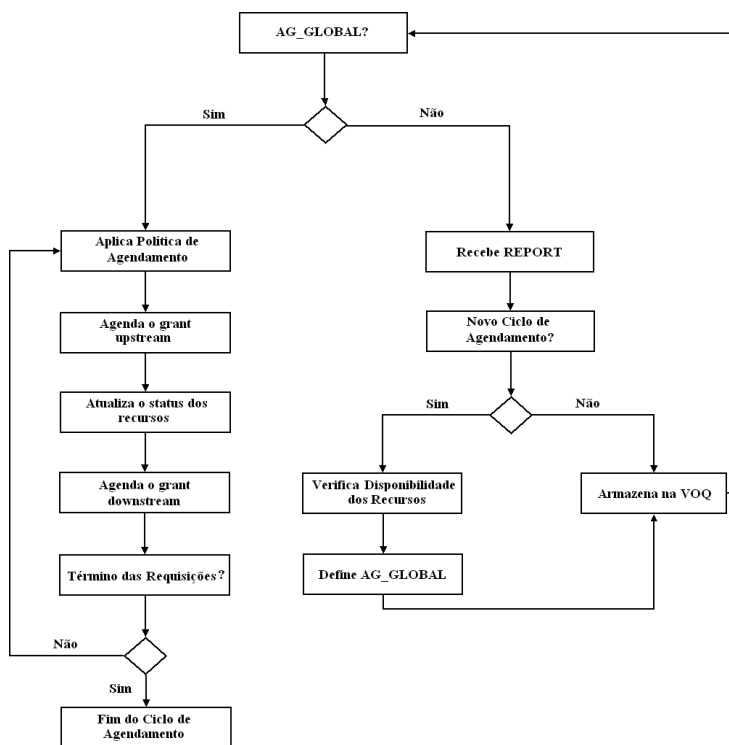


Figura 6 – Operação do algoritmo HGS-PQ

5. Análise dos Resultados

Para a avaliação comparativa do desempenho dos algoritmos, foram utilizados dois cenários de simulação no OMNET++ [Varga, 2003] que representam a arquitetura SUCCESS-HPON com 16 ONUs distribuídas de forma variada ao longo de diferentes áreas de abrangência. A Figura 7(a) 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 (Nós remotos distantes a 5, 10, 15 e 20 km do OLT). O segundo cenário é apresentado na Figura 7(b) onde as ONUs estão distribuídas ao longo de uma área de abrangência de 100km (Nós remotos distantes a 5, 25, 50, 85 e 100 km do OLT), simulando a arquitetura SUCCESS-HPON em um contexto de longo alcance a fim de se avaliar o impacto de grandes atrasos RTTs no desempenho dos algoritmos.

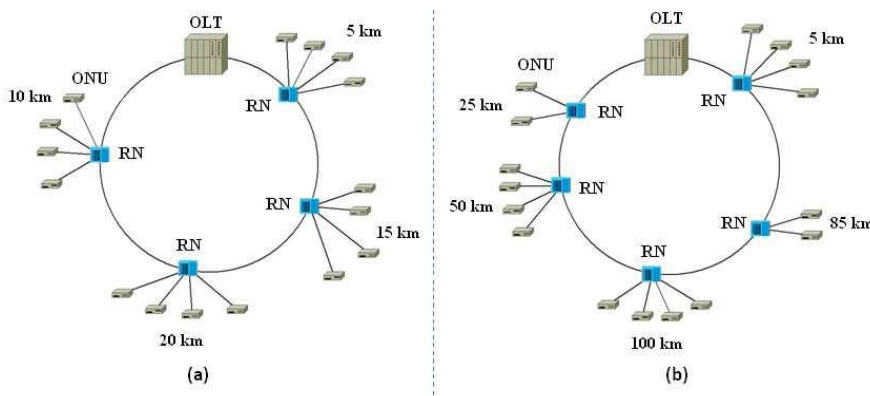


Figura 7 – Cenários de Simulação. SUCCESS-HPON com (a) 20km e (b) 100km

A fim de verificar o impacto da quantidade de recursos no desempenho do algoritmo HGS-PQ, serão avaliadas duas configurações de recursos no OLT, a primeira com 4 transmissores (TX) e 4 receptores (RX), gerando carga total máxima de 40Gbps, e a segunda configuração tem-se 6 TX e 6 RX, com carga total máxima de 60Gbps. 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*. Foram realizadas 15 simulações, de 120 segundos cada, com diferentes sementes geradoras para cada carga e para a análise dos resultados foi considerado o intervalo com nível de confiança de 95%. Os principais parâmetros utilizados na simulação são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros e seus valores

| Parâmetros | Valores |
|--------------------------------|-----------|
| Taxa de Transmissão dos Canais | 10 Gbps |
| Guard Band | 50 ns |
| Tamanho das VOQs | 20 Mbytes |
| ONU_TIMEOUT | 1 ms |
| maxTxDelay | 2 ms |
| MAX_GRANT | 5 Mbits |
| Batch_Period | 1 ms |

5.1 Cenário 1: SUCCESS-HPON com área e abrangência de 20km

A Figura 8 apresenta os atrasos médios dos pacotes *downstream*, *upstream*, bem como a vazão média para configurações diferentes do OLT com 4TX e 4RX.

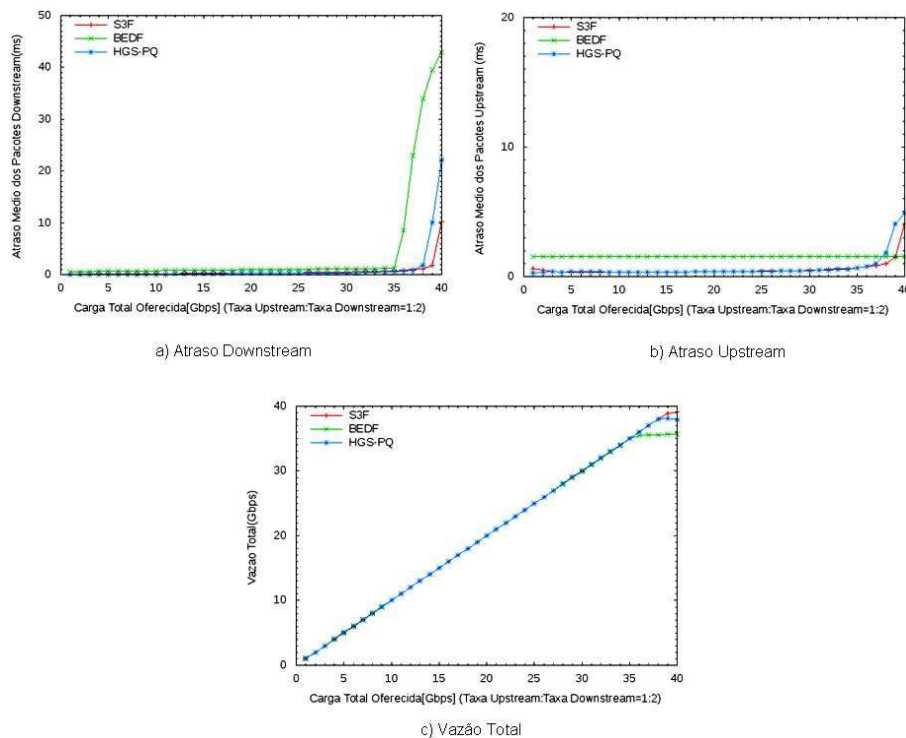


Figura 8 – Média dos Atrasos (a) Downstream, (b) Upstream e (c) Vazão Total para OLT com 4TX e 4RX

Na Figura 8(a), percebe-se que todos os algoritmos apresentam atrasos *downstream* semelhantes em baixas e médias cargas, ambos permanecendo abaixo de 2 ms. O algoritmo HGS-PQ apresentou comportamento bastante próximo ao algoritmo S³F por também utilizar o mecanismo de *grants* para o tráfego *downstream*. Já sob altas cargas, ambos se diferenciam pelo fato do S³F focar somente na eficiência do agendamento, enquanto o HGS-PQ também foca no controle e na priorização de filas. Percebe-se também que o agendamento através de períodos pré-definidos utilizados pelo BEDF interfere negativamente nas transmissões *downstream*.

Nota-se claramente a diferença entre as abordagens de agendamento utilizadas pelos algoritmos através do gráfico de atrasos upstream apresentado na Figura 8(b). Enquanto o algoritmo BEDF apresenta atraso médio upstream constante em função do *Batch Period*, 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 o algoritmo mantém seus atrasos abaixo de 2 ms durante 95% das cargas avaliadas, além de oferecer vantagens para otimização e controle. Verifica-se também na Figura 8(c) 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 S³F.

A Figura 9 apresenta os resultados de atraso e vazão com o OLT com 6TX e 6RX. Na Figura 9(a), 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. Situação semelhante ocorre com os atrasos dos tráfegos *upstream* apresentados na Figura 9(b). 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* utilizado pelo algoritmo HGS-PQ, *grants* maiores são concedidos às ONUs, o que implica no aumento dos atrasos de transmissão.

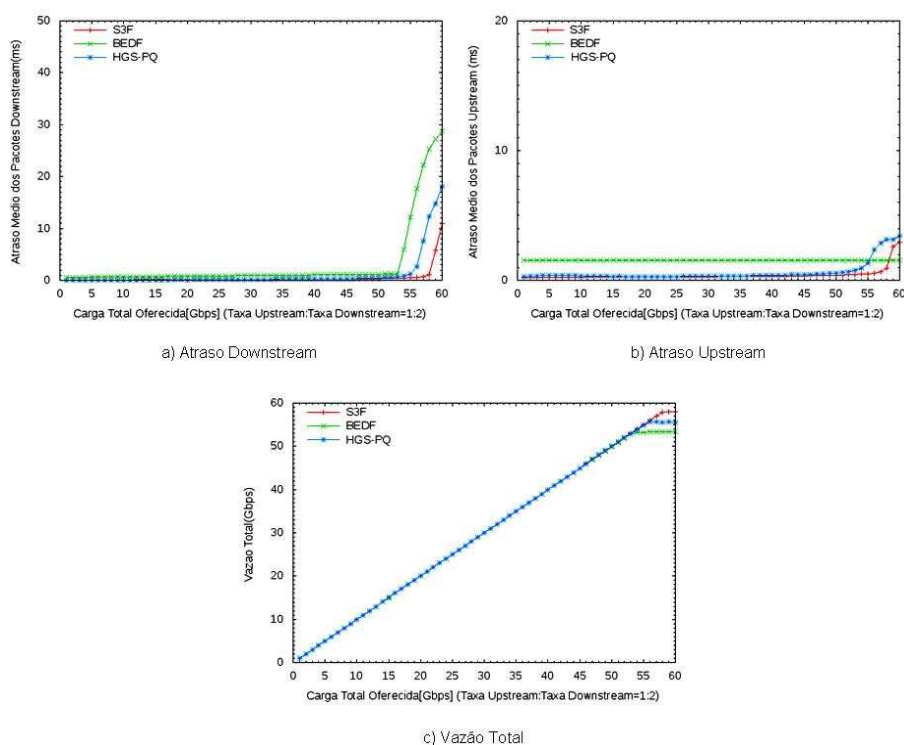


Figura 9 – Média dos Atrasos (a) Downstream, (b) Upstream e (c) Vazão Total para OLT com 6TX e 6RX

Os atrasos do algoritmo HGS-PQ e S³F 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 S³F focar apenas na eficiência do agendamento. Já o desempenho do algoritmo BEDF permaneceu o mesmo em função do *Batch Period* sempre estabelecer atrasos fixos. Em se tratando de utilização dos canais, na Figura 9(c) percebe-se que houve uma ligeira queda de desempenho dos algoritmos. 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.

5.2 Cenário 2: Long-Reach SUCCESS-HPON: 100km de área de abrangência

A Figura 10 apresenta os resultados de atraso *downstream* e *upstream* para análise deste cenário com o OLT utilizando uma configuração de 6 TXs e 6 RXs.

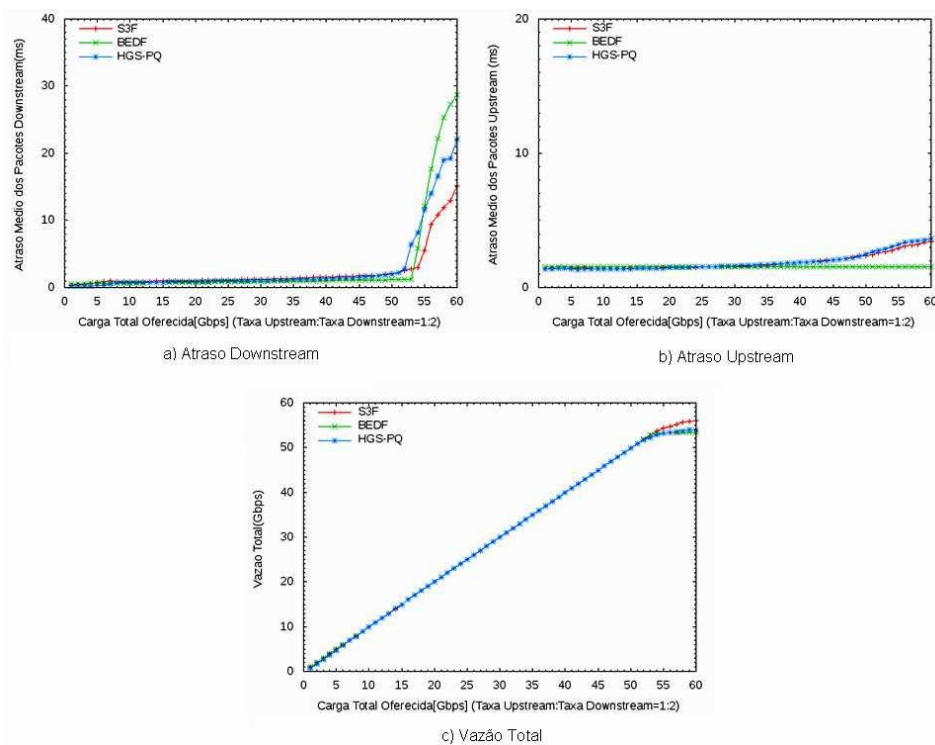


Figura 10 – Média dos Atrasos (a) Downstream, (b) Upstream e (c) Vazão Total para Cenário Long-Reach

Na Figura 10(a), observa-se que os altos RTT influenciaram principalmente nos algoritmos HGS-PQ e S³F 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. Já na Figura 10(b) percebe-se que o problema do MAX_GRANT mencionado anteriormente também influencia as transmissões *upstream*. O comportamento do algoritmo HGS-PQ é bastante semelhante ao do algoritmo S³F 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.

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. Na Figura 10(c) verifica-se que 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. O algoritmo proposto obteve desempenho superior, porém bastante próximo ao BEDF.

6. Conclusão e Trabalhos Futuros

Através de simulações 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.

Uma análise comparativa do algoritmo proposto com os demais algoritmos desenvolvidos para a arquitetura adotada foi realizada neste artigo. Esta análise foi focada no desempenho do agendamento de cada um dos algoritmos, não considerando a modelagem de tráfegos específicos ou serviços. Neste sentido, sugerem-se como trabalhos futuros 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.

7. Referências

- An, F; Kim, K.; Gutierrez et al. SUCCESS: a next-generation hybrid WDM/TDM optical access network architecture, *Journal of Lightwave Technology*, vol 2, issue 11, p 2557-2569. 2004.
- Banerjee A. et al. Wavelength-division multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access. *OSA J. Opt. Netw. Special Issue Optical Access Networks*, vol. 4, no. 11, pp. 737–758, Nov. 2005.
- Evans, D; Manning, J. FTTH Council Europe's First Ever Study Proves Positive Impact on Sustainable Development through FTTH Networks. *Cohesive Communications*. Fev, 2008.
- 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.
- 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.
- Pinedo, M. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*, 2nd ed. Prentice-Hall, 2002.
- Varga, A. OMNeT++: Discrete event simulation system, Technical University of Budapest, version 2.3, June 2003