

Análise de Redes Ópticas Passivas WDM Sobre a Arquitetura SUCCESS-HPON

Antônio J. G. Abelém¹, João Gabriel E. Aleixo²

¹ Departamento de Informática – Universidade Federal do Pará (UFPA) – Rua Augusto Corrêa, 01, 66075-110 – Belém – Brasil

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Pará (UFPA) – Rua Augusto Corrêa, 01, 66075-110 – Belém – Brasil

{abelem, jgabriel}@ufpa.br

Abstract. *This paper aims to investigate the relevant aspects of the implantation process concern to a WDM Passive Optical Network, based on the SUCCESS-HPON architecture, proposed by the Stanford University, applied to MetroBel Network. Besides describing the metropolitan network, we present the main characteristics of SUCCESS-HPON architecture, topology and relevant results gotten through simulation for the scenario approached. The MetroBel Network, coordinated by The National Education and Research Network (RNP), was the first of the new projects of high speed networks in the national metropolitans regions dedicated for research and education that uses own optic fiber.*

Resumo. *Este artigo tem por objetivo investigar e apontar fatores relevantes ao processo de implantação de uma Rede Óptica Passiva WDM, baseada na arquitetura SUCCESS-HPON proposta pela Universidade de Stanford, no cenário da rede metropolitana da cidade de Belém/PA, a Rede MetroBel. São apresentadas as principais características da arquitetura SUCCESS-HPON, sua topologia, algoritmo de agendamento e os resultados relevantes obtidos através de simulações do cenário abordado. A Rede MetroBel, coordenada pela Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP), foi o primeiro dos novos projetos de redes de alta velocidade nas regiões metropolitanas do país dedicada para pesquisa e educação que utiliza fibra óptica própria.*

1. Introdução

Desde que a Internet e as soluções em banda larga para as redes de acesso surgiram durante a última década, o desenvolvimento e a pesquisa de tecnologias de comunicação óptica cada vez mais ganham atenção da indústria e da comunidade científica. Os provedores de acesso, a fim de solucionar o problema do gargalo em suas redes, também apostam em novas tecnologias e modelos, inovando sua infra-estrutura e proporcionando melhores condições de tráfego para seus assinantes.

Com o passar dos anos, além do crescimento em larga escala da quantidade de usuários, estima-se que a capacidade limite de transmissão de tecnologias de acesso que utilizam fios de cobre, como o *Digital Subscriber Line* (DSL) ou o *Cable Modem*, seja atingida por essa alta demanda. Este cenário impõe condições relevantes na escolha de uma nova tecnologia a ser adotada, sendo necessário levar em consideração diversos

fatores, como por exemplo, custo, demanda por largura de banda e limite de quantidade de usuários. Um dos modelos de negócio promissores para os provedores de acesso, o serviço *triple-play* (TPS), que aplica o conceito de redes convergentes, integrando serviços de voz, dados e vídeo na mesma rede, é fortemente considerado como uma tendência no futuro e também necessita de toda esta infra-estrutura apropriada.

É a partir deste cenário que as tecnologias ópticas de acesso ganham destaque com o desenvolvimento das Redes Ópticas Passivas (PONs), que surgiram a fim de eliminar as limitações de largura de banda, implementando uma arquitetura baseada em fibra óptica, com topologia em estrela e com um protocolo MAC baseado no *Time Division Multiple Access* (TDMA). Embora as TDM-PONs possam fornecer quantidade maior de largura de banda quando comparadas com as redes de acesso baseadas em fios de cobre, existe ainda a possibilidade de um aumento adicional desta capacidade através de sua combinação com a tecnologia *Wavelength-Division Multiplexing* (WDM) que possibilita a utilização de múltiplos comprimentos de onda tanto no sentido *upstream* quando no sentido *downstream*.

Diversas arquiteturas WDM-PON foram propostas, porém ainda não houve o aparecimento de nenhuma considerada vitoriosa. Em [Banerjee et al. 2005] essas várias propostas são apresentadas pelos autores, onde são apontadas algumas de suas características, como custos, escalabilidade, distâncias exigidas, esquemas de compartilhamento da fibra, bem como seus principais objetivos.

A arquitetura SUCCESS-HPON é uma dessas várias propostas de arquiteturas já abordadas na literatura. Trata-se de uma arquitetura de acesso óptica híbrida TDM/WDM de nova geração baseada em topologia de anel e em árvores de distribuição, com componentes ajustáveis centralizados de alta velocidade e com novos algoritmos de agendamento. O desafio inicial para o desenvolvimento desta arquitetura era como prover *upgrade* eficiente e transparente das tradicionais TDM-PONs para futuras tecnologias de redes de acesso [An et al. 2004]. Partindo deste princípio, tal projeto procurou focar em algumas metas e objetivos específicos, como por exemplo, garantir coexistência e prover possibilidade de migração transparente das TDM-PONs para WDM-PONs sobre a mesma arquitetura, tornando-se viável tanto para usuários residenciais quanto corporativos.

É baseando-se na arquitetura SUCCESS-HPON que este estudo tem a finalidade de analisar fatores relevantes ao processo de implantação de uma rede óptica passiva WDM através da simulação de um cenário de comunicação óptica metropolitana para a cidade de Belém do Pará: a Rede MetroBel [MetroBel 2007].

Considerada uma rede pioneira, a Rede Metrobel tem por finalidade a implantação de uma infra-estrutura metropolitana óptica na cidade de Belém, interligando as principais instituições de ensino e pesquisa da região. Esta iniciativa faz parte do projeto Redecomep, que tem por objetivo principal promover a implantação de redes metropolitanas comunitárias em 26 cidades do território nacional que abrigam pontos de presença (PoPs) do backbone da Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP) [RNP 2007], o que significa uma cobertura nacional.

O restante deste artigo está organizado nas seguintes seções: a Seção 2 discute alguns trabalhos sobre a arquitetura SUCCESS-HPON, assim como publicações relacionadas às WDM-PONs. Uma visão geral da arquitetura SUCCESS-HPON é feita

na Seção 3, enquanto que o estudo de caso e a simulação realizada são apresentados na Seção 4. Os resultados obtidos e considerações sobre a arquitetura são analisados na Seção 5. Finalmente, a Seção 6 apresenta as considerações finais deste estudo.

2. Trabalhos Relacionados

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

Em [An et al. 2004], os autores propõem uma arquitetura híbrida WDM/TDM de rede óptica de acesso chamada *Stanford University aCCESS* ou *SUCCESS*. Neste artigo, além de se preocupar em descrever o processo de migração do modelo tradicional TDM-PON para WDM-PON viabilizado pela arquitetura, também descrevem a topologia da rede, esquemas de proteção e restauração, características dos equipamentos e geram resultados através de simulação para o protocolo MAC, comprovando que este provê, de maneira eficiente, transmissão bidirecional entre a OLT e ONUs sobre múltiplos comprimentos de onda com um pequeno número de *transmitters e receivers*.

Já em [Kim et al. 2004], os autores abordam o problema de agendamento dos pacotes sobre a arquitetura *SUCCESS*. Neste artigo, é proposto um algoritmo de agendamento, baseado no precursor já utilizado na arquitetura, que provê otimização através de filas de prioridade, as *Virtual Output Queues* (VOQs), no agendamento de mais de um frame. A arquitetura proposta apresenta características únicas que diretamente influenciam no algoritmo de agendamento, como por exemplo, o fato dos *transmitters* ajustáveis e *receivers* na OLT serem compartilhados pelas ONUs com a finalidade de reduzir a quantidade de *transceivers* e reduzir o custo do equipamento. Outra característica relevante para o desenvolvimento de algoritmos para essa arquitetura é que estes *transmitters* ajustáveis não somente geram tráfego de dados downstream, mas também provêm às ONUs rajadas ópticas de *Continuous Wave* (CW) para transmissões upstream. No final do artigo demonstram através de simulações que o novo algoritmo provê maior vazão a altas taxas e maior justeza entre as transmissões *upstream e downstream* quando comparado ao algoritmo de agendamento precursor.

O primeiro *testbed* para a arquitetura proposta pela Universidade de Stanford é descrito em [An et al. 2005a], juntamente com resultados experimentais obtidos. Dentre os resultados, os autores comprovam a viabilidade da transmissão bidirecional no mesmo comprimento de onda da fibra para redes de acesso e da modulação, na ONU, dos dados upstream via CW provida pela OLT, eliminando a necessidade de componentes ajustáveis nas ONUs. Os autores prevêm o desenvolvimento de um segundo *testbed* que implementará o protocolo MAC da arquitetura, bem como do algoritmo de agendamento a ser utilizado.

Em [An et al. 2005b] os autores demonstraram os resultados da análise de desempenho feita para dois novos algoritmos para 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^3F) que, após diversas simulações com as mais variadas configurações de *transmitters* e *receivers*, foram comparados com o algoritmo de agendamento seqüencial original e demonstraram que, além de garantir justiça entre os tráfegos upstream e downstream, melhoram os desempenhos de vazão e atraso.

3. SUCCESS-HPON: Uma Arquitetura Óptica de Acesso de Nova Geração

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, viabilizando um futuro processo de evolução e expansão desta rede e possibilitando 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.

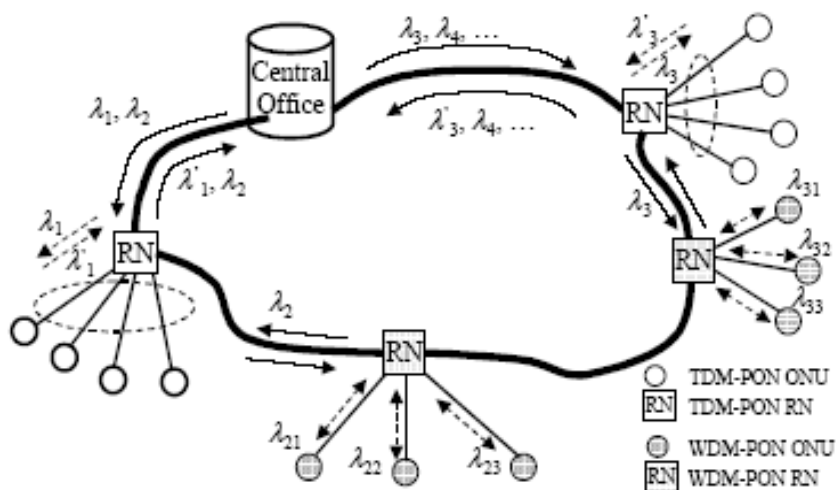


Figura 1. Arquitetura SUCCESS-HPON [An et al. 2005a].

3.1 Características Físicas

A arquitetura possui conexões WDM ponto-a-ponto entre a OLT, que disponibiliza os serviços para os usuários e é representada pela *Central Office*, 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-PON e WDM-PON), 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. [An et al. 2005a]

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 *Arrayed Waveguide Grating* (AWG).

As ONUs WDM, responsáveis por converter o sinal óptico da OLT para as portas padrões dos equipamentos de aplicação do usuário final, possuem dentro de uma grade DWDM de comprimentos de onda, canais dedicados para comunicação com a 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 2(a) demonstra o diagrama do bloco lógico para a parte WDM-PON da OLT SUCCESS-HPON. Levando em consideração que a carga média de uma rede de acesso seja geralmente baixa, a utilização de componentes ajustáveis minimiza a quantidade de *transceivers* e do custo do sistema [An et al. 2005a], sendo compartilhados pelos usuários. Quanto mais usuários entrarem na rede, ou seus tráfegos aumentem, mais *lasers* e receptores ajustáveis são adicionados na OLT. Os sinais ópticos do tráfego *upstream* são separados através da presença dos *circulators*. O *scheduler* controla a operação dos componentes ajustáveis, tanto dos transmissores quanto dos receptores.

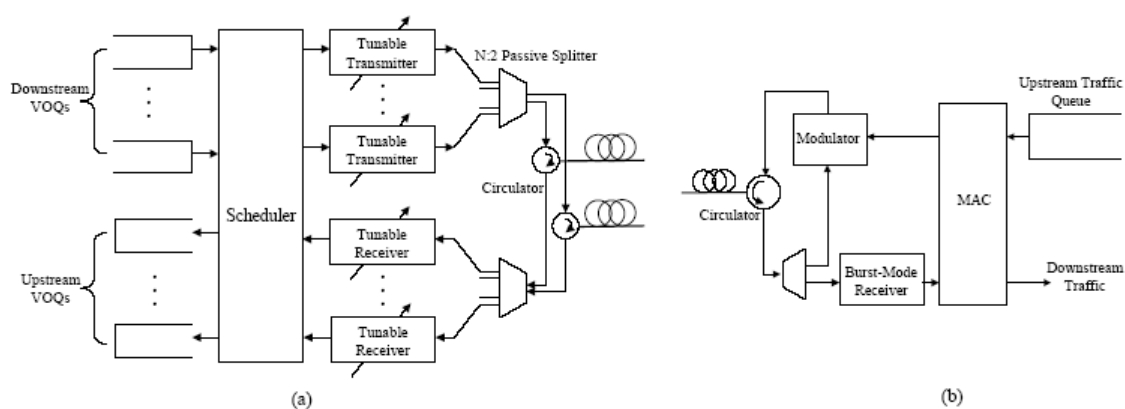


Figura 2. (a) Diagrama do Bloco Lógico OLT e (b) Diagrama do Bloco Lógico ONU [An et al. 2005a].

A Figura 2(b) apresenta o diagrama do bloco lógico da parte WDM-PON da ONU SUCCESS-HPON. A ONU não possui fonte óptica luminosa e, ao invés disso, utiliza um modulador óptico para modular as rajadas de CW recebidas da OLT para sua transmissão *upstream*, realizando assim uma comunicação física *half-duplex*. A ONU também não necessita de um receptor ajustável. O AWG no RN remove comprimentos de onda estranhos e permite apenas um comprimento de onda específico para alcançar a ONU WDM. O receptor apenas necessita possuir largura de banda óptica 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* da OLT, o *polling* e os mecanismos de *reporting*.

Maiores detalhes sobre os componentes físicos da arquitetura SUCCESS-HPON, podem ser obtidos em [An et al. 2005a].

3.2. Protocolo MAC e Formato dos Frames

O protocolo MAC utilizado pela SUCCESS-HPON utiliza o mecanismo de *polling* para checar a quantidade de tráfego upstream armazenado nas ONUs OLT enviando permissões, no formato de rajadas CW, para permitir que as ONUs transmitam seu tráfego *upstream*. Este protocolo emprega a sinalização *in band* e utiliza *frames* com campos *Report* e *Grant* definidos para o mecanismo de *polling* e envio de permissões, 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 o frame deve ser utilizado.

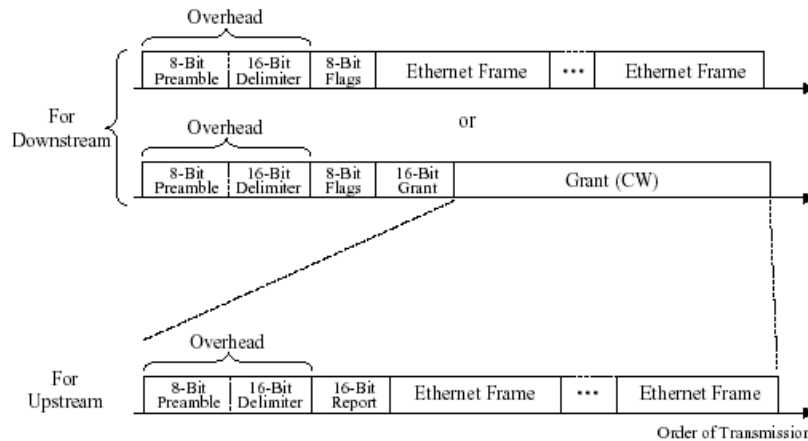


Figura 3. Formato dos *Frames* para o protocolo MAC SUCCESS-HPON [An et al. 2005a].

Dois parâmetros de controle são de fundamental importância para o gerenciamento do mecanismo de *polling*. A variável *ONU_TIMEOUT* contém o tempo máximo pelo qual a OLT deve enviar um *grant* para determinada ONU e receber o respectivo frame upstream com o campo *Report* solicitando nova transmissão. Caso esse tempo expire, indicando perda do frame ou ausência de tráfego upstream pela ONU, um novo *grant* é enviado. A variável *MAX_GRANT* contém o tamanho máximo

concedido pelo *grant* para que uma determinada quantidade de bits não seja excedida no tráfego upstream das ONUs.

3.3 Algoritmo de Agendamento

Na arquitetura SUCCESS-HPON, todos os transmissores e receptores ajustáveis são localizados na OLT. Isso 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, como transmissores e receptores ajustáveis, comprimento de onda alocado para uma determinada ONU e seus *round trip times* (RTTs), além de organiza-los nos tempos e nos comprimentos corretos para transmissões upstream e downstream.

Alguns trabalhos já foram realizados focando no desenvolvimento de algoritmos de agendamento para a arquitetura SUCCESS-HPON. Em [An et al. 2005b], comprovou-se que o algoritmo *Sequential Scheduling with Schedule-Time Framing* (S³F) além de possuir baixa complexidade computacional, pode prover maior vazão e menores atrasos quando comparado ao seu precursor e ao *Batching Earliest Departure First* (BEDF).

O algoritmo S³F é baseado no algoritmo original de agendamento sequencial proposto no primeiro projeto da arquitetura, porém, difere deste por utilizar *Virtual Output Queues* (VOQs) para cada tráfego e realizar o agendamento dos *frames* após o término da transmissão de cada um (exceto quando este chega em uma VOQ vazia, sendo agendado imediatamente logo após sua chegada). Para maiores detalhes do algoritmo S³F, verificar [An et al. 2005b].

4. Estudo de Caso

As instituições de pesquisa e educação superior (IPEs) têm demonstrado, de alguns anos para cá, a grande importância da utilização da Internet para viabilizar projetos de cooperação e colaboração. Com o advento das novas aplicações avançadas de rede e a crescente necessidade do aumento de largura de banda e qualidade na transmissão multimídia, cada vez mais é fundamental o estudo e a análise de soluções para atender a estas aplicações e seus requisitos.

Atento às necessidades de expansão de comunicação e colaboração das IPEs, o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) elaborou uma iniciativa de grande alcance, o Projeto Rede-Conhecimento, que tem a Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP) como responsável pela melhoria e ampliação da infra-estrutura nacional da rede. O objetivo é criar uma nova e robusta infra-estrutura nacional óptica de alta capacidade para comunicação, computação e conhecimento, operando em patamar de velocidade de múltiplos gigabits e integrando ações de computação de alto desempenho e bibliotecas digitais, promovendo a implantação de redes metropolitanas comunitárias em 26 cidades do território nacional que abrigam pontos de presença (PoPs) do backbone da RNP [RNP 2007].

Foi a partir deste projeto que a cidade de Belém foi contemplada com a implantação da Rede Metrobel, uma infra-estrutura metropolitana óptica capaz de

interligar IPEs da região e fornecer, além de outros benefícios, acesso à Internet através do *backbone* da RNP. O estudo de caso tem por finalidade abordar esta rede como um cenário para a simulação de uma rede óptica passiva WDM sobre a arquitetura SUCCESS-HPON, obtendo métricas relevantes, considerando o melhor custo-benefício possível e analisando fatores fundamentais para um processo de implantação.

4.1. Descrição do Cenário

Inicialmente, 13 são as IPEs que farão parte do enlace óptico da Rede Metrobel. Por haver diversos campi espalhados pela cidade, 30 são os sites que compreendem todas estas instituições. A topologia a ser avaliada segue as mesmas características já descritas e utilizadas pela arquitetura SUCCESS-HPON, possibilitando ainda a capacidade de expansão da rede com a inclusão de novas instituições de acordo com o interesse das mesmas.

Um anel coletor de única fibra com estrelas anexadas ao mesmo define a topologia básica. O centro das estrelas é representado pelo RN, que por sua vez é conectado às ONUs de cada um dos sites das instituições. Uma conexão WDM ponto-a-ponto conecta a OLT, presente no PoP-RNP situado na Universidade Federal do Pará (UFPA), com cada um dos RNs. Embora a arquitetura SUCCESS-HPON seja uma arquitetura híbrida, possibilitando a coexistência de nós TDM-PON e WDM-PON, a Rede MetroBel, para efeitos de simulação, possuirá somente nós WDM-PONs. Nenhum comprimento de onda é reutilizado no anel.

A tecnologia de redes locais predominantemente utilizada pelas IPEs que já fazem parte do projeto da Rede Metrobel é a tecnologia Ethernet. Esta questão influi diretamente na implantação e simulação da arquitetura SUCCESS-HPON, pois prevê o encapsulamento dos pacotes IP gerados pelas ONUs ou OLT por *frames* Ethernet, que por sua vez são encapsulados pelos *frames* SUCCESS na transmissão *upstream* via CW ou *downstream*.

4.2 Simulação e Parâmetros Utilizados

A arquitetura avaliada é constituída por 30 ONUs dispostas na região metropolitana com distâncias variadas da OLT, numa faixa entre 900m e 20Km. Para gerar os resultados aqui obtidos, foi utilizado um modelo desenvolvido pela Universidade de Stanford para o *Objective Modular Network Testbed in C++* (OMNeT++) [Varga 2003]. Tal modelo somente é utilizado para sistemas WDM-PON sobre a arquitetura SUCCESS-HPON.

Através de um estudo comparativo [An et al. 2005b], o desempenho dos algoritmos BEDF e S³F foi mensurado e os resultados apontaram o S³F como o algoritmo mais eficiente, considerando métricas como vazão e média de atraso dos *frames*. O estudo também comprova que o tamanho máximo de um *grant* definido em 5Mb prevê melhor desempenho em relação a outras configurações analisadas. Por estes resultados, pela menor complexidade e pelo seu potencial para controle de QoS e justiça nos tráfegos *upstream* e *downstream*, o S³F foi o algoritmo de agendamento escolhido para ser utilizado nas simulações da Rede Metrobel.

É comum nas redes de acesso que os usuários recebam mais *frames* do que transmitam. Desta maneira, o tráfego também foi modelado de acordo com [An et al. 2005b], considerando o tráfego downstream como sendo duas vezes maior que o tráfego upstream, distribuído de maneira uniforme da OLT para as ONUs. Os valores de *timeout* das ONUs e *Guard band* (tempo de ajuste dos transceivers na OLT e sincronização) foram definidos em 1ms e 50ns, respectivamente, e o tamanho das VOQs na OLT e a fila de tráfego upstream nas ONUs foram definidas como 10MBytes. A taxa de transmissão é de 10Gbps por canal e a capacidade total de carga imposta na rede é o produto da quantidade de transmissores na OLT com a taxa utilizada pelo canal (= TX x R).

O objetivo das simulações foi analisar o custo-benefício e o impacto da distribuição das ONUs na região metropolitana, junto a vazão total e média total dos atrasos dos *frames* obtidos, dado uma determinada quantidade de *transmitters* (TX) e *receivers* (RX).

5 Resultados Obtidos e Considerações sobre a Arquitetura

Levando em consideração o esquema de compartilhamento dos componentes ajustáveis proposto pela arquitetura, a Figura 4 demonstra que, com a utilização do algoritmo S³F, a quantidade de transmissores e receptores na OLT, presente no PoP-RNP, interfere na média total do atraso dos *frames*. O comportamento deste atraso permaneceu semelhante em grande parte das cargas impostas na rede, tanto para a quantidade de *transmitters* igual a quatro (TX=4) quanto para oito (TX=8), alterando-se significativamente somente em cargas mais próximas à carga total (soma de todas as taxas *upstream* e *downstream* da rede).

A partir do momento em que cargas maiores foram injetadas na rede, a configuração definida com quantidades iguais de *transmitters* e *receivers* demonstrou melhor desempenho. Para TX=4, a média total dos atrasos se manteve abaixo dos 20ms, e para TX=8, abaixo de 10ms.

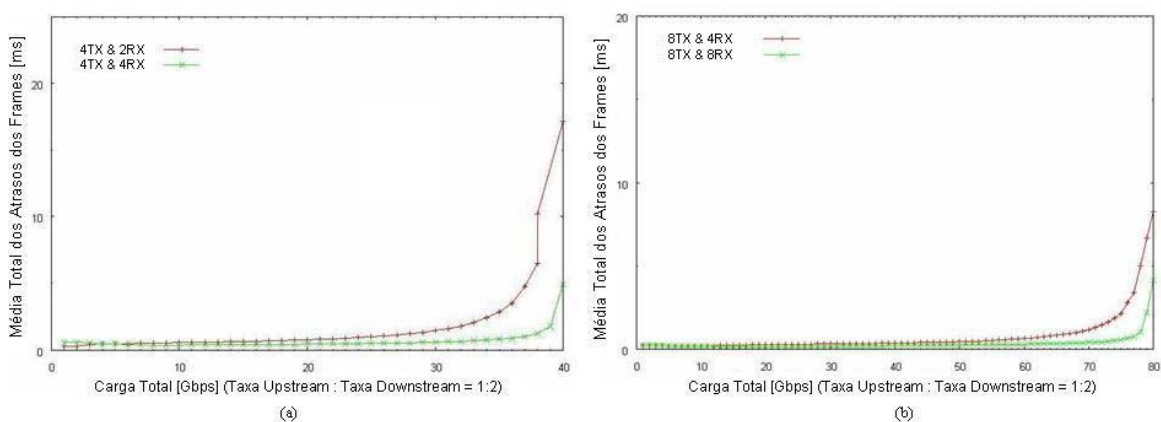


Figura 4. Média Total dos Atrasos x Carga Total na Rede: (a) Para TX=4; (b) para TX=8

Em se tratando da vazão na rede, em [An et al. 2005b] foi comprovado que, quanto maior o tamanho do *grant*, maior é a vazão total obtida. Para a simulação da Rede Metrobel, o tamanho máximo do *grant* foi definido como 5Mb. Este valor é o limite máximo de pacotes Ethernet que as ONUs poderão encapsular em CWs enviadas no sentido upstream para a OLT. A Figura 5 demonstra que a vazão total obtida pelas duas configurações se aproxima da capacidade total, tanto dos quatro quanto dos oito *transmitters*. Novamente percebe-se o impacto da quantidade de *transmitters* e *receivers* na OLT, onde a configuração que apresenta melhor resultado é a de números iguais entre eles.

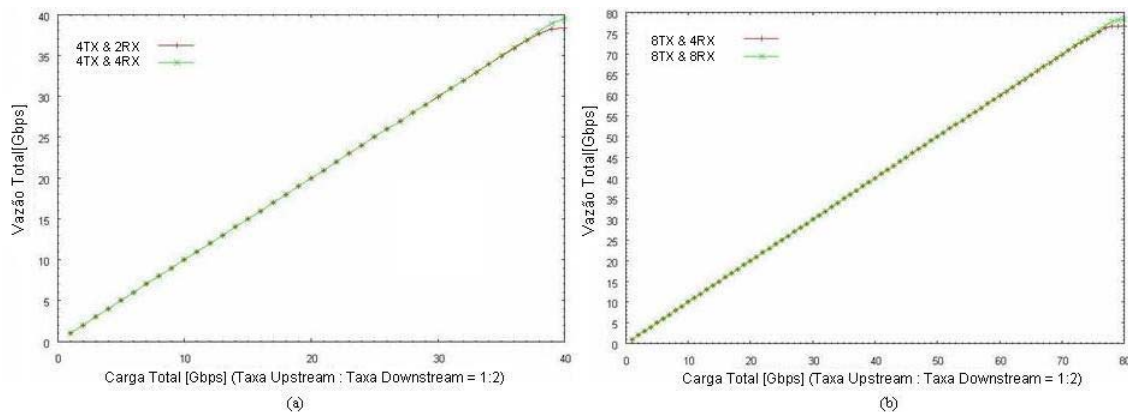


Figura 5. Vazão Total x Carga Total na Rede: (a) Para TX=4; (b) para TX=8

Um detalhe relevante a ser considerado na implantação de uma arquitetura é o custo dos equipamentos utilizados. Em termos gerais, grandes empresas de telecomunicações não consideram que a tecnologia WDM-PON seja economicamente viável até 2011 [Fuller M. 2006] em função do melhor custo-benefício das GPONs e EPONs, porém, por se tratar de uma tecnologia bastante promissora e capaz de atender a demanda que futuramente essas tecnologias possam não suportar, diversas são as abordagens propostas na literatura na tentativa de redução do custo das ONUs através de diferentes modelos e tecnologias [Lee et al. 2005b].

Embora seja uma tecnologia tecnicamente bastante viável, ainda é considerada muito cara. Para que um comprimento de onda seja alocado para cada assinante, tanto para o tráfego upstream quanto downstream, a implementação de lasers do tipo *wavelength-specific distributed feedback* (DFB) ou ajustáveis nas ONUs encarece significativamente o preço do equipamento, tornando-o inviável para este tipo de usuário.

No caso da arquitetura SUCCESS-HPON, as ONUs não utilizam nenhum tipo de *laser*, modulando e amplificando CWs vindas da OLT e enviando para a mesma no sentido upstream. Desta maneira, sua viabilidade econômica depende diretamente da produção em larga escala e redução do custo de moduladores ópticos, como por exemplo, o *semiconductor optical amplifier* (SOA). Na OLT, cada um dos *transmitters* ajustáveis pode atingir qualquer ONU. Apesar da utilização desse tipo de componente reduzir o número de *transceivers*, estes dispositivos apresentam custo significativo, logo, o custo a pagar pela expansão da rede também pode ser alto.

Para efeito comparativo, observou-se a partir dos resultados obtidos que, tanto para TX=4 quanto TX=8, a vazão resultante para cargas totais na rede inferiores a 40Gbps é muito semelhante em ambas as configurações. Considerando a média total dos atrasos para cargas inferiores a 30Gbps, muito próxima é a diferença dos valores entre as mesmas. Estes resultados demonstram a necessidade da análise e do planejamento relacionados à quantidade de carga total que possivelmente será imposta na rede, considerando variados tipos de aplicações avançadas de rede, a fim de evitar subutilização e gastos desnecessários com componentes.

6. Considerações Finais

Este estudo apresentou considerações relevantes ao processo de implantação de redes WDM-PONs sobre a arquitetura SUCCESS-HPON através da simulação do cenário da rede metropolitana da cidade de Belém, a Rede Metrobel. Além apresentar os resultados obtidos através da simulação, também foi descrita a topologia da arquitetura, suas principais características e os equipamentos envolvidos.

Notou-se também que é necessário considerar que, para viabilizar um processo de implantação de uma rede WDM-PON, é necessário o planejamento e a análise de métricas relevantes a fim de estimar custos, quantidade de carga total que será injetada na rede, possíveis aplicações a serem utilizadas e largura de banda necessária para atender uma determinada quantidade de usuários e não subutilizar nenhum tipo de componente.

Através dos resultados e gráficos obtidos por meio da simulação, notou-se que, através da utilização do algoritmo de agendamento considerado mais eficaz para a arquitetura [An et al. 2005b], diferentes configurações relacionadas à quantidade de *transmitters* e *receivers* influem diretamente na vazão e na média do atraso dos pacotes. Cada laser ajustável é agendado a comunicar-se com diversas ONUs espalhadas sobre diversos grupos através da mudança de seu comprimento de onda e, partindo deste princípio, verificou-se que configurações com números iguais de *transmitters* e *receivers* apresentam desempenho melhor, podendo apresentar vazão total muito próxima a carga total máxima oferecida na rede e média total de atraso que não comprometa aplicações avançadas que sejam sensíveis a tal métrica.

Referências

- An, F.T. et al. (2004). SUCCESS: a next-generation hybrid WDM/TDM optical access network architecture, IEEE/OSA JLT 11, 2557-2569.
- An, F.T., et al. (2005a) SUCCESS-HPON: 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.
- An, F.T., et al. (2005b) Design and Performance Analysis of Scheduling Algorithms for WDM-PON under SUCCESS-HPON Architecture IEEE/OSA J.Lightwave Tech., vol. 23, no. 11.

- Banerjee, A., Park, Y., Clarke, F., Song, H., Yang, S., Kramer, G., Kim, K. e Mukherjee B. (2005). Wavelengthdivision-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review[Invited]. *J. Opt. Netw.* 4, 737-758.
- Fuller, M. (2006) Industry Contemplates WDM-PON Technology. Disponível em: <http://fibers.org/articles/news/8/9/3>. Acesso em: Fevereiro, 2007
- Kim, K. S., et al.(2004) Batch scheduling algorithm for SUCCESS WDM-PON. Proc. of GLOBECOM, Dallas, TX, USA.
- Lee, S.M., et al. (2005) Dense WDM-PON based on Wavelength Locked Fabry-Perot Lasers. in Proc. Conf. Optical Fiber Commun.OFC2005, paper JWA55.
- Metrobel. Rede MetroBel. Disponível em : <http://www.redecomep.rnp.br/modelo/>. Acesso em: Janeiro, 2007
- RNP. Rede Nacional de Ensino e Pesquisa. Disponível em: <http://www.rnp.br/>. Acesso em: Janeiro, 2007.
- WAN Packet Size Distribution (1997). Disponível em: <http://www.nlanr.net/NA/Learn/packetsizes.html>. Acesso em: Janeiro
- Varga, A. (2003) OMNET++: Discrete event simulation system, Technical University of Budapest, version 3.3.