



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Algoritmos para Alocação de Banda em Redes de Acesso
GPON

AUTOR: Alex Ferreira dos Santos

ORIENTADOR: Prof. Dr. Amílcar Careli César

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da USP como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Telecomunicações

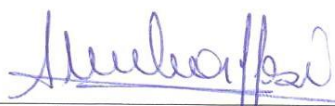
São Carlos – SP

2010

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel ALEX FERREIRA DOS SANTOS.

Dissertação defendida e julgada em 26/02/2010 perante a Comissão Julgadora:



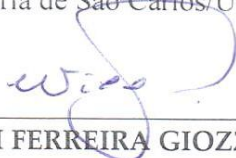
Prof. Associado **AMÍLCAR CARELI CÉSAR** – (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO



Prof. Titular **MURILO ARAUJO ROMERO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado



Prof. Dr. **WILLIAM FERREIRA GIOZZA**
(Universidade de Brasília/UnB)

APROVADO



Prof. Titular **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus e aos meus pais, Ademir Fernandes e Ana Rita Ferreira, o mais profundo agradecimento pelo total apoio, incentivo e ensinamentos que contribuem para seguir adiante nos estudos e na vida.

Minha irmã, Cristiane, pelo apoio, incentivo e compreensão.

Aos meus tios, Roque e Idnalva (Nalvinha) Ferreira pelo carinho e dedicação que sempre tiveram por mim.

Aos meus tios, Agnovaldo e Marizete Fernandes pelos conselhos e incentivos.

Aos meus avós Moises Nascimento Ferreira e a Maria Nascimento Ferreira pelos valores religiosos e familiares ensinados ao longo de minha vida.

Para todos os familiares que torceram e incentivaram durante a realização desta etapa na minha vida.

Aos professores William Giozza e Karcus Assis, pelas orientações nos projetos de iniciações científicas e monografia de conclusão do curso de Ciência da Computação, as quais me capacitaram para a realização desse trabalho.

Ao professor Amílcar Careli César, pela oportunidade, orientação, confiança, dedicação e pelos exemplos de profissionalismo repassados ao longo da convivência.

Aos professores do grupo de Telecom, pelos conhecimentos repassados.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP, pela presteza e eficiência. Aos demais pertencentes à instituição.

Aos colegas e amigo(a)s do departamento, Aldir, Anderson (Maria), Anderson Betiol, Artur, Breno Caetano, Carmen, Clenilson (Indiã), Daniel, Daniel Barbosa, Danilo, Eduardo (Pumba), Eduardo (Edu), Eduardo Martinelli, Emiliano, Fernando (Kostela), Getúlio, Gustavo Fraidenraich, Guilherme, Helvécio (Bambi), Hermes, Lorena, Luizir (Português), Marcelo (Maria), Mariana, Pedro, Rafael (Big), Tany (Peruano), Ulisses, Valdemir e Yang (Chinês), pela oportunidade da convivência diária, conhecimentos repassados, conversas no “momento do café” e demais situações de descontração que contribuíram para trazer alegria, ao longo da estada em São Carlos.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro, e ao projeto em conjunto com a Fundação CPqD, em especial à Miriam Regina Xavier de Barros, ao Sandro Marcelo Rossi e ao Marcos Perez Mokarzel.

RESUMO

Neste trabalho propomos e analisamos algoritmos de alocação dinâmica de banda para rede óptica passiva (PON) de acesso padrão GPON (Gigabit PON). Estes algoritmos utilizam dados oriundos de SLA (*service level agreement*) para gerenciar a alocação de banda e classificar em 4 contêineres de tráfego (T-CONT) o tráfego gerado em 16 ONUs (*optical network unit*). Na transmissão *upstream* é utilizada a técnica de multiplexação por divisão de tempo (TDM) para gerenciar o acesso ao meio, evitando colisões. O primeiro algoritmo proposto aloca banda garantida para as ONUs e distribui a banda não utilizada de acordo com critério baseado em três SLAs. A taxa de bit *upstream* é 1,25 Gbps e o desempenho do algoritmo é analisado com base na variação do atraso de pacotes em função do tráfego gerado nas ONUs. O segundo algoritmo proposto utiliza ponderação de tráfego. Neste, analisamos o comportamento dos atrasos e a quantidade de banda solicitada e atendida por ONU quando as bandas garantida e extra são alteradas. Por fim, acrescentamos em nossa implementação um intervalo para o processamento do algoritmo de alocação dinâmica de banda (DBA) e resposta do hardware relacionado ao ciclo de interrogação. Então, analisamos o atraso de pacotes quando variamos o intervalo de processamento do DBA. Ao final, propomos uma solução preliminar para minimizar estes atrasos. Os resultados obtidos por meio de simulação computacional mostram a versatilidade dos algoritmos.

Palavras-chave: Comunicação óptica, Passive Optical Network (PON), Gigabit PON (GPON), alocação dinâmica de banda, Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA).

ABSTRACT

In this work we propose and analyze the performance of dynamic bandwidth allocation algorithms for optical passive networks (PON) in GPON standard (Gigabit PON). These algorithms use data from SLA (service level agreement) to manage bandwidth allocation and classify in 4 traffic containers (T-CONT) the traffic generated by 16 ONUs (optical network unit). In the upstream transmission the time division multiplexing (TDM) technique is used to manage the medium access, avoiding collisions. The first proposed algorithm allocates guaranteed bandwidth for the ONUs and distributes the bandwidth not used according to the criteria based on three SLAs. The upstream bit rate is 1.25 Gbps and the algorithm performance is analyzed based on the packets delay variation versus the traffic generated by ONUs. The second proposed algorithm uses weighted traffic. In this, we analyze the delay performance and the required bandwidth for each ONU and how much it is served when the guaranteed and extra bandwidth are changed. Finally, we added in our implementation an interval for the processing of the dynamic bandwidth allocation algorithm (DBA) and response of the hardware related to the interrogation cycle. In the end, we propose a preliminary solution to minimize these delays. The results obtained by means of computational simulation show the versatility of the algorithms.

Key-words: Optical communication, Passive Optical Network (PON), Gigabit PON (GPON), dynamic bandwidth assignment, Time Division Multiple Access (TDMA).

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 ARTIGOS PUBLICADOS DURANTE A REALIZAÇÃO DESTA PESQUISA | 4 |
| CAPÍTULO 2 - REDES ÓPTICAS PASSIVAS | 5 |
| 2.1 ARQUITETURAS DE REDES PON..... | 5 |
| 2.1.1 COMPONENTES DAS REDES PON | 5 |
| 2.1.2 TOPOLOGIA DE REDES PON | 6 |
| 2.1.2.1 TOPOLOGIA EM BARRAMENTO | 6 |
| 2.1.2.2 TOPOLOGIA EM ANEL | 7 |
| 2.1.3 TÉCNICAS DE ACESSO MÚLTIPLO | 8 |
| 2.1.3.1 TDMA..... | 8 |
| 2.1.3.2 WDMA | 8 |
| 2.1.3.3 OCDMA..... | 9 |
| 2.2 PADRÕES DE REDES PON..... | 9 |
| 2.2.1 APON/BPON | 9 |
| 2.2.2 EPON | 10 |
| 2.2.3 GPON..... | 10 |
| CAPÍTULO 3 - REDE GPON | 12 |
| 3.1 TRANSMISSÃO E ESTRUTURAS DOS PACOTES GPON..... | 12 |
| 3.2 TAMANHO DOS PACOTES EM PADRÃO GPON | 16 |
| 3.3 MODELAGEM DE TRÁFEGO | 17 |
| CAPÍTULO 4 - ALOCAÇÃO DE BANDA EM GPON | 18 |
| 4.1 ALGORITMOS DE ALOCAÇÃO DE BANDA..... | 19 |
| 4.1.1 CLASSE DE SERVIÇO, QUALIDADE DE SERVIÇO E CONTRATO DE SERVIÇO | 21 |
| 4.2 ALGORITMO DMB (<i>DYNAMIC MINIMUM BANDWIDTH</i>) | 24 |
| 4.2.1 SIMULAÇÃO DO DMB | 26 |
| CAPÍTULO 5 - RESULTADOS NUMÉRICOS..... | 28 |
| 5.1 ALGORITMO SEM PONDERAÇÃO | 28 |
| 5.1.1 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA | 29 |
| 5.1.2 SIMULAÇÃO – ALGORITMO PARA UM CONTÊINER | 31 |
| 5.1.3 SIMULAÇÃO – ALGORITMO PARA QUATRO CONTÊINERES..... | 35 |
| 5.1.4 DESEMPENHO DO ALGORITMO SEM PONDERAÇÃO EM FUNÇÃO DA BANDA GARANTIDA | 39 |
| 5.2 ALGORITMO COM PONDERAÇÃO | 40 |
| 5.2.1 SIMULAÇÃO 1 | 41 |

| | | |
|-------------------------|---|-----------|
| 5.2.2 | SIMULAÇÃO 2 | 43 |
| 5.2.3 | SIMULAÇÃO 3 | 45 |
| 5.3 | ALGORITMO DE ALOCAÇÃO TOTAL DE BANDA | 47 |
| 5.3.1 | SIMULAÇÃO 1 | 49 |
| 5.3.2 | SIMULAÇÃO 2 | 51 |
| 5.4 | DIVISÃO DA BANDA TOTAL DA REDE PARA TODAS AS ONUS | 53 |
| 5.5 | SIMULAÇÃO DE UMA REDE GPON COM INTERVALO DE PROCESSAMENTO DO DBA..... | 55 |
| 5.5.1 | SIMULAÇÃO 1 | 57 |
| 5.5.2 | SIMULAÇÃO 2 | 63 |
| 5.5.3 | SIMULAÇÃO 3 | 67 |
| 5.5.4 | ALGORITMO PARA MINIMIZAR O ATRASO CAUSADO PELO INTERVALO DE PROCESSAMENTO DO DBA | 70 |
| CONCLUSÕES..... | | 74 |
| APÊNDICE A..... | | 75 |
| A1. | DISTRIBUIÇÃO DE POISSON..... | 75 |
| A2. | DISTRIBUIÇÃO DE PARETO E TRÁFEGO AUTO-SIMILAR | 76 |
| A3. | SIMULAÇÃO DO TRÁFEGO | 77 |
| REFERÊNCIAS..... | | 79 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Rede Óptica Passiva..... | 2 |
| Figura 2. Estrutura de uma rede PON..... | 6 |
| Figura 3. Topologia em barramento..... | 7 |
| Figura 4. Topologia em anel..... | 7 |
| Figura 5. Topologia em árvore..... | 8 |
| Figura 6. Exemplo de transmissão de tráfego no sentido <i>upstream</i> em padrão GPON e blocos de controle. No bloco DBR _u a ONU informa o status da fila, solicitando <i>time slots</i> . OLT: <i>Optical line terminal</i> ; ONU: <i>Optical network unit</i> ; PLO: <i>Physical layer overhead</i> (obrigatório em todas as transmissões); PLOAM: <i>Physical layer operations, administration, and maintenance</i> ; PLS: <i>power leveling sequence</i> ; DBR: <i>dynamic band report</i> ; u: <i>upstream</i> | 13 |
| Figura 7. Quadro GTC <i>upstream</i> . PLO: <i>physical layer overhead</i> ; PLOAM: <i>physical layer operations, administration, and maintenance</i> ; PLS: <i>power leveling sequence</i> ; DBR: <i>dynamic bandwidth report</i> ; BIP: <i>bit interleaved parity</i> ; ID: <i>identificador</i> ; DBA: <i>dynamic bandwidth assignment</i> ; CRC: <i>cyclic redundancy check</i> ; u: <i>upstream</i> | 14 |
| Figura 8. Quadro <i>downstream</i> . PSync: <i>Physical Synchronization</i> ; Ident: <i>identificador</i> ; PLOAM: <i>physical layer operations, administration, and maintenance</i> ; BIP: <i>Bit interleaved parity</i> ; PLen: <i>comprimento do payload</i> ; US BW Map: <i>mapa de largura de banda</i> ; d: <i>downstream</i> | 14 |
| Figura 9. Atuação do MAC (<i>Media access control</i>). PCB: <i>physical control Block</i> ; USBW: <i>upstream bandwidth</i> ; Alloc – ID: <i>especificação de fila de uma ONU</i> ; CRC: <i>cyclic redundancy check</i> ; PLO: <i>physical layer overhead</i> ; PLOAM: <i>physical layer operations, administration, and maintenance</i> ; PLS: <i>power leveling sequence</i> ; DBR: <i>dynamic bandwidth report</i> ; t _{RT} : <i>intervalo de ida e volta (RTT)</i> ; t _{proc} : <i>tempo de processamento</i> ; u: <i>upstream</i> ; d: <i>downstream</i> | 15 |
| Figura 10. Quadro GTC (<i>GPON transmission convergence</i>). | 16 |
| Figura 11. Fragmentação do pacote; PTI (<i>Payload Type Indicator</i>). | 16 |
| Figura 12. Crescimento do tráfego da Internet; Exabyte: 10 ¹⁸ [46]..... | 19 |
| Figura 13. Alocação estática de banda. Se as ONUs não possuem dados a transmitir (quadrado branco na figura) os <i>time slots</i> alocados a elas ficam indisponíveis para serem utilizados por outras ONUs. A operadora de serviços não pode ampliar o número de ONUs porque a banda utilizada de forma ineficiente não permite. | 20 |
| Figura 14. Alocação dinâmica de banda. Em sequência, o primeiro (da esquerda para a direita) <i>time slot</i> não utilizado pela ONU C é alocado para a ONU A; o segundo <i>time slot</i> não utilizado pela ONU C é alocado para a ONU B; O <i>time slot</i> não utilizado pela ONU A é alocado para a ONU B. Desta forma, a transmissão <i>upstream</i> não exibe <i>time slot</i> desocupado, aumentando a eficiência da rede..... | 20 |
| Figura 15. Fluxo de mensagens <i>upstream</i> e <i>downstream</i> em GPON. | 21 |
| Figura 16. Esquema da operação classificação de tráfego das ONUs em T-CONTs e agendamento de transmissão no sentido <i>upstream</i> | 22 |
| Figura 17. Banda garantida (CIR), de pico (PIR) e banda não utilizada (EIR)..... | 23 |
| Figura 18. Algoritmo de alocação dinâmica de banda DMB [13]. Variação do atraso médio de pacote em função da carga oferecida por ONU para 1 contêiner de tráfego. A distribuição das ponderações para cada SLA é especificada na Tabela 3..... | 27 |
| Figura 19. Fluxograma do algoritmo sem ponderação. CIR: <i>Committed information rate</i> ; EIR: <i>Excess information rate</i> ; SLA: <i>Service level agreement</i> | 31 |
| Figura 20. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para os 3 SLAs e um contêiner de tráfego. A sequência de prioridade de SLA é mostrada na Tabela 5 e os parâmetros da simulação na Tabela 6. | 32 |

| | |
|---|----|
| Figura 21. Volume de tráfego da rede em Terabyte relacionado com as bandas solicitadas e atendidas por ONU em função dos SLAs para 100% de carga oferecida por ONU. A linha horizontal delimita a quantidade de banda garantida e a quantidade de banda extra alocado para cada SLA. Abaixo desta linha temos a quantidade de banda garantida e acima a quantidade de banda extra. | 33 |
| Figura 22. Bandas solicitadas e atendidas por SLA pela quantidade média de solicitações da rede. Calculada para 100% de carga oferecida por ONU, um contêiner de tráfego e média de cinco simulações. A linha horizontal delimita a quantidade de banda garantida e a quantidade de banda extra. Abaixo desta linha temos a banda garantida e acima a banda extra..... | 34 |
| Figura 23. Bandas solicitadas e atendidas pelo SLA ₃ pela quantidade média de solicitações da rede. Calculada para várias condições de carga oferecida por ONU, um contêiner de tráfego e média de cinco simulações. A linha horizontal delimita a quantidade de banda garantida e a quantidade de banda extra. Abaixo desta linha temos a banda garantida e acima a banda extra. | 35 |
| Figura 24. Atraso médio dos T-CONTs de prioridade alta (SLA ₁). | 36 |
| Figura 25. Atraso médio dos T-CONTs de prioridade média (SLA ₂). | 37 |
| Figura 26. Atraso médio dos T-CONTs de prioridade baixa (SLA ₃). | 37 |
| Figura 27. Atraso médio dos três tipos de SLA para o T-CONT 3. | 38 |
| Figura 28. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para os 3 SLAs, um contêiner de tráfego e três valores de banda garantida. A sequência de prioridade de SLA é mostrada na Tabela 5 e os parâmetros da simulação na Tabela 6. A Tabela 9 lista a banda garantida e a banda extra alocada nesta simulação. | 39 |
| Figura 29. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para os 3 SLAs e um contêiner de tráfego. A sequência de prioridade de SLA é mostrada na Tabela 10 e os parâmetros da simulação na Tabela 6. | 42 |
| Figura 30. Bandas solicitadas e atendidas por SLA pela quantidade média de solicitações da rede. Calculada para 100% de carga oferecida por ONU, um contêiner de tráfego e média de cinco simulações. A linha horizontal delimita a quantidade de banda garantida e a quantidade de banda extra. Abaixo desta linha temos a banda garantida e acima a banda extra..... | 42 |
| Figura 31. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para os 3 SLAs e um contêiner de tráfego. A sequência de prioridade de SLA é mostrada na Tabela 12 e os parâmetros da simulação na Tabela 6. | 44 |
| Figura 32. Bandas solicitadas e atendidas por SLA pela quantidade média de solicitações da rede. Calculada para 100% de carga oferecida por ONU, um contêiner de tráfego e média de cinco simulações. A linha horizontal delimita a quantidade de banda garantida e a quantidade de banda extra. Abaixo desta linha temos a banda garantida e acima a banda extra..... | 44 |
| Figura 33. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para os 3 SLAs e um contêiner de tráfego. A sequência de prioridade de SLA é mostrada na Tabela 14 e os parâmetros da simulação na Tabela 6. | 46 |
| Figura 34. Bandas solicitadas e atendidas por SLA pela quantidade média de solicitações da rede. Calculada para 100% de carga oferecida por ONU, um contêiner de tráfego e média de cinco simulações. A linha horizontal delimita a quantidade de banda garantida e a quantidade de banda extra. Abaixo desta linha temos a banda garantida e acima a banda extra..... | 46 |
| Figura 35. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para os 3 SLAs e um contêiner de tráfego. A sequência de prioridade de SLA é mostrada na Tabela 16 e os parâmetros da simulação na Tabela 6. | 50 |
| Figura 36. Bandas solicitadas e atendidas por SLA pela quantidade média de solicitações da rede. Calculada para 100% de carga oferecida por ONU, um contêiner de tráfego e média de cinco simulações. | 50 |

| | |
|--|----|
| Figura 37. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para os 3 SLAs e um contêiner de tráfego. A sequência de prioridade de SLA é mostrada na Tabela 18 e os parâmetros da simulação na Tabela 6. | 52 |
| Figura 38. Bandas solicitadas e atendidas por SLA pela quantidade média de solicitações da rede. Calculada para 100% de carga oferecida por ONU, um contêiner de tráfego e média de cinco simulações. | 52 |
| Figura 39. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para os 3 SLAs e um contêiner de tráfego. A sequência de prioridade de SLA é mostrada na Tabela 20 e os parâmetros da simulação na Tabela 6. | 54 |
| Figura 40. Bandas solicitadas e atendidas por SLA pela quantidade média de solicitações da rede. Calculada para 100% de carga oferecida por ONU, um contêiner de tráfego e média de cinco simulações. A linha horizontal delimita a quantidade de banda garantida e a quantidade de banda extra. Abaixo desta linha temos a banda garantida e acima a banda extra. | 54 |
| Figura 41. Transmissão de dados com intervalo de processamento do DBA relacionada ao ciclo de interrogação. | 57 |
| Figura 42. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA ₁ para intervalo de processamento do DBA de 1 a 5 e também de 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego. | 58 |
| Figura 43. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA ₂ para intervalo de processamento do DBA de 1 a 5 e também de 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego. | 59 |
| Figura 44. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA ₃ para intervalo de processamento do DBA de 1 a 5 e também de 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego. | 59 |
| Figura 45. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA ₁ para intervalo de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego. | 60 |
| Figura 46. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA ₂ para intervalo de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego. | 61 |
| Figura 47. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA ₃ com intervalos de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego. A linha vertical representa o atraso médio para 50% de carga oferecida pela ONU. Esta linha é para ressaltar a localização dos pontos retirados para a geração do gráfico da Figura 48, na qual analisamos as bandas solicitadas e atendidas por ONU. | 62 |
| Figura 48. Bandas solicitadas e atendidas pelo SLA ₃ para 50% de carga oferecida pela ONU com e sem intervalo de processamento do DBA. Estes resultados foram baseados em cinco simulações com um contêiner. A linha horizontal delimita a quantidade de banda garantida e a quantidade de banda extra. Abaixo desta linha temos a banda garantida e acima a banda extra. | 63 |
| Figura 49. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA ₁ para intervalos de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego. | 64 |
| Figura 50. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA ₂ com intervalos de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego. | 65 |
| Figura 51. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA ₃ com intervalo de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego. A linha vertical representa o atraso médio para 50% de carga oferecida pela ONU. | |

| | |
|--|----|
| Esta linha é para ressaltar a localização dos pontos retirados para a geração do gráfico da | |
| Figura 52, na qual analisamos as bandas solicitadas e atendidas por ONU..... | 66 |
| Figura 52. Bandas solicitadas e atendidas pelo SLA ₃ para 50% de carga oferecida pela ONU | |
| com e sem intervalo de processamento do DBA. Estes resultados foram baseados em cinco | |
| simulações contendo um contêiner. A linha horizontal delimita a quantidade de banda | |
| garantida e a quantidade de banda extra. Abaixo desta linha temos a banda garantida e acima a | |
| banda extra..... | 67 |
| Figura 53. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA ₁ com | |
| intervalo de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de | |
| tráfego..... | 68 |
| Figura 54. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA ₂ com | |
| intervalo de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de | |
| tráfego..... | 69 |
| Figura 55. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA ₃ com | |
| intervalo de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de | |
| tráfego. A linha vertical representa o atraso médio para 50% de carga oferecida pela ONU. | |
| Esta linha é para ressaltar a localização dos pontos retirados para a geração do gráfico da | |
| Figura 56, na qual analisamos as bandas solicitadas e atendidas por ONU..... | 69 |
| Figura 56. Bandas solicitadas e atendidas pelo SLA ₃ para 50% de carga oferecida pela ONU | |
| com e sem intervalo de processamento do DBA. Estes resultados foram baseados em cinco | |
| simulações contendo um contêiner. A linha horizontal delimita a quantidade de banda | |
| garantida e a quantidade de banda extra. Abaixo desta linha temos a banda garantida e acima a | |
| banda extra..... | 70 |
| Figura 57. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA ₁ com | |
| intervalo de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de | |
| tráfego. Neste gráfico apresentamos os resultados computacionais quando acrescentamos a | |
| banda extra no momento da atualização dos <i>time slots</i> | 71 |
| Figura 58. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA ₂ com | |
| intervalo de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de | |
| tráfego. Neste gráfico apresentamos os resultados computacionais quando acrescentamos a | |
| banda extra no momento da atualização dos <i>time slots</i> | 72 |
| Figura 59. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA ₃ com | |
| intervalo de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de | |
| tráfego. Neste gráfico apresentamos os resultados computacionais quando acrescentamos a | |
| banda extra no momento da atualização dos <i>time slots</i> | 72 |
| Figura 60. Conceito de auto-similaridade. (a) forma genérica ilustrativa; (b) Rajada formada a | |
| partir da agregação de pacotes de bytes. | 76 |
| Figura 61. Geração de rajadas utilizando modelo Pareto limitado. Os parâmetros de simulação | |
| são: $1/\lambda=1$ e $1/\lambda=3$. Tamanho mínimo dos pacotes: 53 bytes; tamanho máximo: 1518 bytes; | |
| tamanho mínimo da rajada: $k=1.000$ pacotes; tamanho máximo: $p=1.000.000$; fator de forma: | |
| $\alpha=1,4$ | 78 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Principais características das redes APON/BPON, EPON e GPON [40]..... | 11 |
| Tabela 2. Cenário de requisito de banda para alguns serviços [1]. | 18 |
| Tabela 3. Distribuição das ponderações do algoritmo DMB [13]. | 24 |
| Tabela 4. Parâmetros de simulação do algoritmo proposto no padrão GPON. | 26 |
| Tabela 5. Prioridades dos SLAs e distribuição das ONUs. | 29 |
| Tabela 6. Parâmetros de simulação do algoritmo proposto no padrão GPON. | 32 |
| Tabela 7. Prioridades dos SLAs, atraso médio para 100% de carga por ONU (ms), número de ONUs por SLA, banda garantida e extra em 100 % de carga (Mbps). | 34 |
| Tabela 8. Atraso médio dos T-CONTs dos SLAs para 100% de carga por ONU..... | 37 |
| Tabela 9. Banda garantida e banda extra para alocação. Rede com 16 ONUs e 1,25 Gbps. ... | 39 |
| Tabela 10. Prioridades dos SLAs, distribuição das ONUs, banda garantida e porcentagem de banda extra. | 41 |
| Tabela 11. Prioridades dos SLAs, atraso médio para 100% de carga por ONU (ms), número de ONUs por SLA, banda garantida e extra em 100 % de carga (Mbps). | 43 |
| Tabela 12. Prioridades dos SLAs, distribuição das ONUs, banda garantida e porcentagem de banda extra. | 43 |
| Tabela 13. Prioridades dos SLAs, atraso médio para 100% de carga por ONU (ms), número de ONUs por SLA, banda garantida e extra em 100 % de carga (Mbps). | 45 |
| Tabela 14. Prioridades dos SLAs, distribuição das ONUs, banda garantida e porcentagem de banda extra. | 45 |
| Tabela 15. Prioridades dos SLAs, atraso médio para 100% de carga por ONU (ms), número de ONUs por SLA, banda garantida e extra em 100 % de carga (Mbps). | 47 |
| Tabela 16. Prioridades dos SLAs, distribuição das ONUs, porcentagem de banda total e banda garantida total. | 49 |
| Tabela 17. Prioridades dos SLAs, atraso médio para 100% de carga por ONU (ms), número de ONUs por SLA e banda garantida em 100 % de carga (Mbps). | 51 |
| Tabela 18. Prioridades dos SLAs, distribuição das ONUs, porcentagem de banda total e banda garantida total. | 51 |
| Tabela 19. Prioridades dos SLAs, atraso médio para 100% de carga por ONU (MS), número de ONUs por SLA, banda garantida em 100 % de carga (Mbps). | 53 |
| Tabela 20. Prioridades dos SLAs, atraso médio para 100% de carga por ONU (ms), número de ONUs por SLA, banda garantida e extra em 100 % de carga (Mbps). | 53 |
| Tabela 21. Dados para simulação do DBA com e sem intervalo de processamento relacionado aos ciclos de interrogação. Prioridade dos SLAs, distribuição das ONUs, banda garantida e porcentagem de banda extra. | 58 |
| Tabela 22. Atraso médio de pacotes em relação ao intervalo do processamento do DBA para os SLAs em 100% de carga por ONU. | 63 |
| Tabela 23. Atraso médio dos pacotes em relação ao intervalo do processamento do DBA para os SLAs em 100% de carga por ONU. | 67 |
| Tabela 24. Atraso médio dos pacotes em relação ao intervalo de processamento do DBA para os SLAs em 100% de carga por ONU. | 70 |

LISTA DE ACRÔNIMOS

| | |
|-------|--|
| APON | ATM PON |
| ATM | Asynchronous transfer mode |
| BIP | Bit interleaved parity |
| BPON | Broadband PON |
| CBR | Constant bit rate |
| CIR | Committed information rate |
| CO | Central office |
| CoS | Class of service |
| CRC | Cyclic redundancy check |
| DBA | Dynamic bandwidth allocation |
| DBR | Dynamic bandwidth report |
| DBRu | Dynamic bandwidth report upstream |
| DMB | Dynamic minimum bandwidth |
| DSL | Digital subscriber line |
| EIR | Excess information rate |
| EoD | Education on demand |
| EPON | Ethernet PON |
| EFM | Ethernet in the first mile |
| FEC | Forward error correction |
| FSAN | Full services access network |
| FTTB | Fiber to the building |
| FTTC | Fiber to the curb |
| FTTH | Fiber to the home |
| GPON | Gigabit PON |
| GTC | GPON transmission convergence |
| HDTV | High-definition television |
| HFC | Hybrid fiber-coax, cable modem |
| HIS | High speed interface |
| IPACT | Interleaved polling with adaptive cycle time |
| MAC | Medium access control |

| | |
|--------|--|
| MAI | Multiple access interference |
| OAM&P | Operation, administration, maintenance and provisioning |
| OCDMA | Optical code division multiple access |
| OLT | Optical line terminal |
| ONU | Optical network unit |
| PCB | Physical control block |
| PCBd | PCB downstream |
| PIR | Peak information rate |
| PLO | Physical layer overhead |
| PLOu | PLO upstream |
| PLOAM | Physical layer operations, administration, and maintenance |
| PLOAMd | PLOAM downstream |
| PLOAMu | PLOAM upstream |
| PLS | Power leveling sequence |
| PLSu | PLS upstream |
| PON | Passive optical network |
| PSync | Physical synchronization |
| PTI | Payload type indicator |
| P2MP | Point-to-multipoint |
| P2P | Point-to-point |
| QoS | Quality of service |
| RTT | Round trip time |
| RF | Radio frequency |
| SDTV | Standard-definition television |
| SLA | Service level agreement |
| TDM | Time division multiplexing |
| TDMA | Time division multiple access |
| VBR | Variable bit rate |
| VoD | Video on demand |
| VoIP | Voice over Internet protocol |
| WDM | Wavelength division multiplexing |
| WDMA | Wavelength division multiple access |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As redes de acesso têm se tornado objeto de intensa expansão e oferta de tecnologias. Comparadas com as redes metropolitanas e de longa distância, a infraestrutura próxima do usuário, conhecida inicialmente como *last mile* e recentemente *first mile*, tem sido um gargalo para a oferta de serviços de banda larga. Destacam-se os sistemas eletrônicos cabeados (*wireline*), como x-DSL (*digital subscriber line*) e HFC (*hybrid fiber-coax, cable modem*), e sem fio (*wireless*), como 3G, WiMAX e WiFi. Estas redes ocupam nichos tecnológicos atraentes, especialmente os que oferecem mobilidade.

No entanto, estima-se que em futuro não muito distante, os usuários residenciais necessitarão de uma largura de banda que varie entre 70 a 100 Mbps no sentido de descida (*downstream*) e 20 a 30 Mbps no sentido de subida (*upstream*) [1]. Esta banda *downstream* é capaz de acomodar canais HDTV (*high-definition television*) e SDTV (*standard-definition television*), navegação na Internet, VoIP (*voice over Internet protocol*), jogos online e outros serviços banda larga. Para suprir estas necessidades de largura de banda tem-se utilizado as redes PON (*passive optical network*).

A PON é uma arquitetura de rede de acesso ponto-multiponto que utiliza divisores (*splitters*) de sinal óptico para que vários usuários sejam atendidos por uma mesma fibra óptica. A arquitetura é mais econômica e a utilização da largura de faixa da fibra óptica é uma excelente alternativa para resolver o “gargalo” por demanda de banda. A configuração de uma rede PON é formada por terminal de linha óptica (OLT— *optical line terminal*), localizada na central do provedor de serviço, e unidade de rede óptica (ONU— *optical network unit*), localizada perto do usuário [2]. A Figura 1 ilustra uma rede óptica passiva.

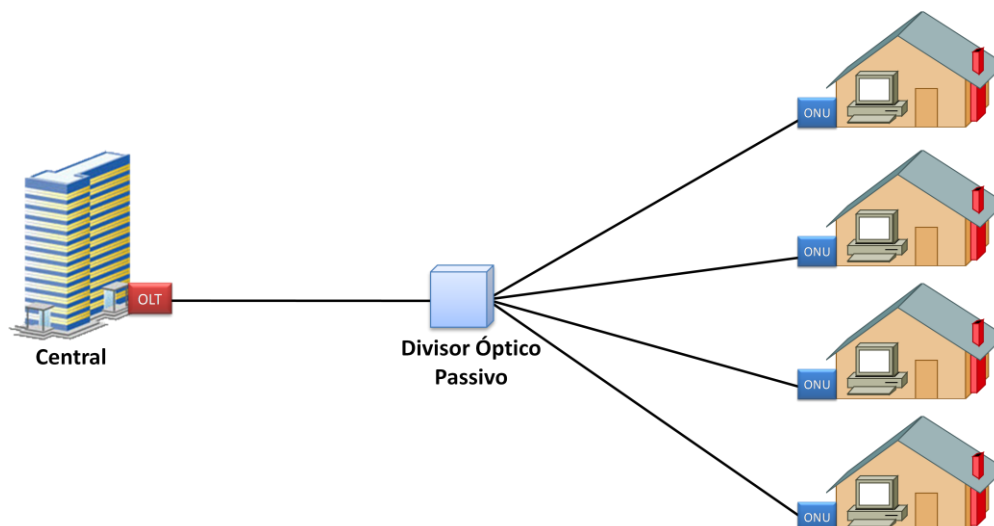


Figura 1. Rede Óptica Passiva

A transmissão no sentido *downstream* (da OLT para as ONUs) é realizada por meio de difusão (*broadcast*). Cada ONU identifica seu tráfego por meio de endereçamento. No sentido *upstream* (das ONUs para a OLT), a transmissão é realizada utilizando acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA— *time division multiple access*), compartilhando o meio de transmissão. Comprimentos de onda distintos são utilizados para a transmissão nos dois sentidos.

Há dois padrões de arquitetura PON adotados atualmente: o EPON (*Ethernet PON*), regulamentado pela norma IEEE 802.3ah [3], e o GPON (*Gigabit PON*), regulamentado pela norma ITU-T G.984 [4]. O padrão EPON utiliza o protocolo Ethernet e o GPON o método de encapsulação GTC (*GPON transmission convergence*), que suporta quadros ATM (*asynchronous transfer mode*), TDM (*time division multiplexing*) e Ethernet [4]-[6]. Estes dois últimos são encapsulados primeiro no GEM (*GPON encapsulating method*) e posteriormente no GTC. A taxa máxima de dados do padrão GPON é 2,5 Gbps e do EPON é 1 Gbps. A crescente demanda de banda poderá ainda ser atendida por esquemas WDM (*wavelength division multiplexing*)-PON [7]. O próximo patamar de taxa dos dois padrões será 10 Gbps [8], [9].

O padrão EPON tem sido adotado pelas operadoras de redes de acesso do sudeste asiático, enquanto o GPON tem sido escolhido principalmente por operadoras européias e norte-americanas. A tendência das operadoras brasileiras é também adotar o padrão GPON para acesso via fibra óptica [10]. Novos estudos estão sendo realizados e este trabalho aborda as redes GPON.

O padrão GPON classifica o tráfego *upstream* nas ONUs em 4 tipos e os reúne em 5

contêineres (T-CONT). O T-CONT 1 agrupa tráfego CBR (*constant bit rate*); o T-CONT 2, tráfego VBR (*variable bit rate*); o T-CONT 3, tráfego em rajada; o T-CONT 4, tráfego *best-effort*; o T-CONT 5, combinação de tráfego de outros contêineres. A sequência dos T-CONTs indica a prioridade de tráfego para transmissão no sentido *upstream* [11].

Para transmitir o tráfego no sentido *upstream*, como o meio é compartilhado, é necessário definir a quantidade, ou tamanho, de *time slots* para que as ONUs efetuem a transmissão. Os *time slots* são definidos pelos algoritmos de alocação de banda implementados na OLT. Vários algoritmos de alocação de banda têm sido propostos, principalmente os que atuam de forma dinâmica (DBA— *dynamic bandwidth allocation*) [11], [12]-[16]. Dentre os DBAs para padrão GPON destaca-se o algoritmo DMB (*dynamic minimum bandwidth*) [12], [13], que aloca banda mínima para cada ONU. A banda eventualmente não-utilizada é realocada para as ONUs de prioridade mais alta que necessitar de banda. No caso do padrão EPON foram propostos vários DBAs [17]-[21], com destaque para o IPACT (*interleaved polling with adaptive cycle time*) [22].

Em geral, os algoritmos alocam banda de acordo com as informações de classe de serviço (CoS – *class of service*), qualidade de serviço (QoS – *quality of service*) e SLA (*service level agreement*). Os 5 T-CONTs do padrão GPON são as indicações de CoS; QoS é um conjunto de requisitos de qualidade, como banda e atraso de pacotes; SLA é um conjunto de especificações de serviços e prioridades, negociado entre provedor e usuário, e que pode utilizar informações de CoS e QoS. Para que as operadoras possam fazer um contrato de serviço com os usuários é necessário definir a banda garantida (CIR— *committed information rate*), conhecer a banda disponível para realocação (EIR— *excess information rate*) e saber a quantidade total de banda da rede (PIR— *peak information rate*) [5]. Os algoritmos de alocação de banda são criados com base nos conceitos apresentados anteriormente.

Neste trabalho propomos e analisamos o desempenho de algoritmos de alocação dinâmica de banda para rede de acesso por fibra óptica e padrão GPON, operando com taxa de bit 1,25 Gbps. Os algoritmos organizam as filas de tráfego gerado em 16 ONUs de acordo com as especificações de 4 T-CONTs (CoS). Não utilizamos o T-CONT 5 devido este ser uma combinação de tráfegos.

Os próximos capítulos estão organizados da seguinte forma:

O Capítulo 2 aborda as principais topologias e tecnologias existentes para as redes ópticas passivas (PON). No Capítulo 3 é apresentada a estrutura de uma rede GPON. Nesta, são abordadas a geração do tráfego, a fragmentação e a transmissão de pacotes *upstream* e

downstream. O Capítulo 4 apresenta alguns critérios para gerenciar a largura de banda e a validação da simulação utilizando o algoritmo DMB [13]. No Capítulo 5 são apresentados os resultados numéricos das simulações de uma rede GPON com taxa de transmissão de 1,25 Gbps e 16 ONUs. O Capítulo 6 destina-se às conclusões e propostas de trabalhos futuros.

1.1 ARTIGOS PUBLICADOS DURANTE A REALIZAÇÃO DESTA PESQUISA

Esta pesquisa gerou até esta data o seguinte artigo.

A. F. Santos, S. M. Rossi e A. C. César, “Algoritmo de Alocação Dinâmica de Banda para Rede Óptica de Acesso GPON”, XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, ISBN 978-85-89748-05-6, Blumenau – SC, de 29 de setembro a 02 de outubro de 2009.

CAPÍTULO 2

REDES ÓPTICAS PASSIVAS

Nos últimos anos as operadoras de telecomunicações têm mostrado interesse em fornecer aos clientes residenciais diversos serviços que requerem grande largura de banda, dentre eles, HDTV, videoconferência e VoiP. Para isto, é necessário utilizar fibras ópticas. Nesta seção apresentamos as topologias e tecnologias existentes para as redes ópticas passivas (PON).

2.1 ARQUITETURAS DE REDES PON

2.1.1 COMPONENTES DAS REDES PON

As redes ópticas passivas são compostas por fibras ópticas e diversos dispositivos ópticos e sistemas, como ONUs, OLTs, filtros, divisores passivos e lasers. Os principais componentes ópticos e sistemas são descritos a seguir.

OLT: Terminal de linha óptica. Está localizada na central da operadora de serviços, conectando a rede de acesso à rede metropolitana. A OLT transmite sinal óptico, que é distribuído para os diversos usuários através dos divisores ópticos passivos. Uma OLT é formada por diversos servidores que fornecem serviços, como VoiP, HDTV e Internet. Toda a transmissão da rede é gerenciada pela OLT.

ONU: Unidade de rede óptica. Está localizada próxima do assinante. A ONU concentra o tráfego até que possa ser transmitido para a OLT. Além disso, quando a OLT envia as mensagens em *broadcast*, as ONUs reconhecem apenas as mensagens destinadas à ela e ignoram as demais. Outra funcionalidade importante é a conversão do sinal óptico em elétrico para os dispositivos padrões, como telefones, computadores, TV e outros equipamentos de aplicação do usuário final.

Divisor Passivo (*Splitter*): Este dispositivo está localizado entre a OLT e a ONU, sendo responsável por dividir ou combinar o sinal óptico da fibra. No sentido *downstream*, o sinal de entrada é dividido e enviado para todas as portas de saída. No sentido *upstream*, o

sinal de todas as ONUs é combinado e transmitido à OLT.

A utilização de componentes passivos reduz os custos na infraestrutura e manutenção da rede óptica. A Figura 2 apresenta de forma simplificada a estrutura de uma rede PON.

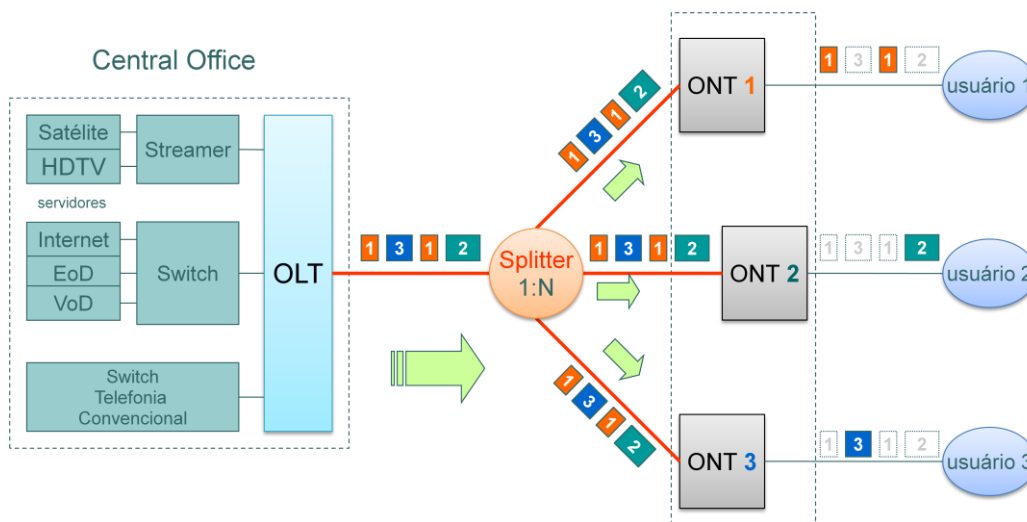


Figura 2. Estrutura de uma rede PON.

2.1.2 TOPOLOGIA DE REDES PON

As redes ópticas passivas podem ser formadas por três topologias: em anel, barramento ou árvore. Cada topologia apresenta características distintas, sendo implementadas conforme a necessidade. Algumas destas características são resumidas a seguir.

2.1.2.1 TOPOLOGIA EM BARRAMENTO

Na topologia em barramento, a OLT é interligada a diversas ONUs por meio de um segmento de fibra óptica que conecta vários divisores passivos (*splitters*) com fator de derivação 1:2. Estes *splitters* criam dois segmentos, um para a conexão à ONU e outro para o próximo divisor, como ilustrado na Figura 3. Essa topologia é útil para aplicações FTTC (*fiber to the curb*), na qual segmentos de fibras são instalados nos gabinetes de distribuição, localizados geralmente em armários ou postes, onde estão os divisores e/ou ONUs, que fazem a conectividade via fibra óptica, cabo coaxial ou sem fio para os usuários finais [23], [24].

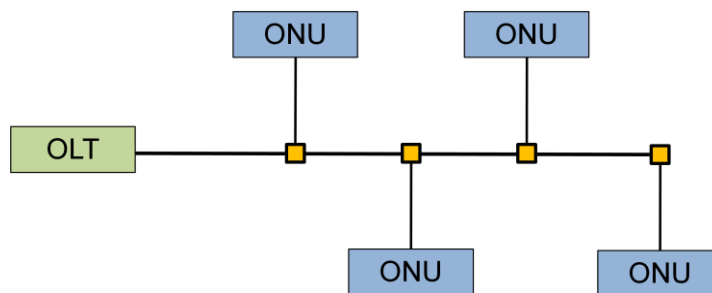


Figura 3. Topologia em barramento.

2.1.2.2 TOPOLOGIA EM ANEL

Na topologia em anel, duas ONUs são conectadas a uma OLT criando dois segmentos de transmissão. As demais ONUs são conectadas de forma serial, formando um barramento óptico, mostrado na Figura 4. A principal vantagem é a proteção, pois caso ocorra um rompimento da fibra, o tráfego da rede circula na outra direção [2].

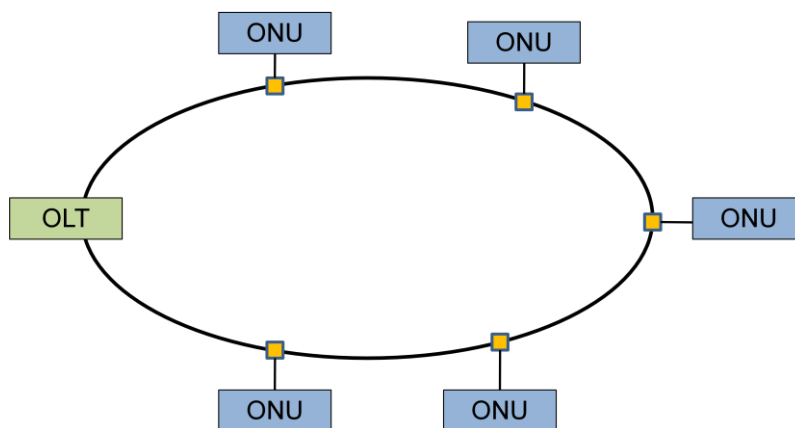


Figura 4. Topologia em anel.

2.1.2.3 TOPOLOGIA EM ÁRVORE

Na topologia em árvore, uma OLT é conectada a um divisor óptico passivo por meio de uma fibra. A partir deste divisor, as ONUs são interligadas à OLT, como é apresentado na Figura 5. Esta topologia é ponto-multiponto (P2MP – *point-to-multipoint*), no sentido *downstream* (OLT para as ONUs) e ponto-a-ponto (P2P – *point-to-point*), no sentido *upstream* (ONU para a OLT). A grande vantagem dessa topologia é a redução de custos na estrutura da rede, pois utiliza menos componentes passivos que as demais topologias [2], [25].

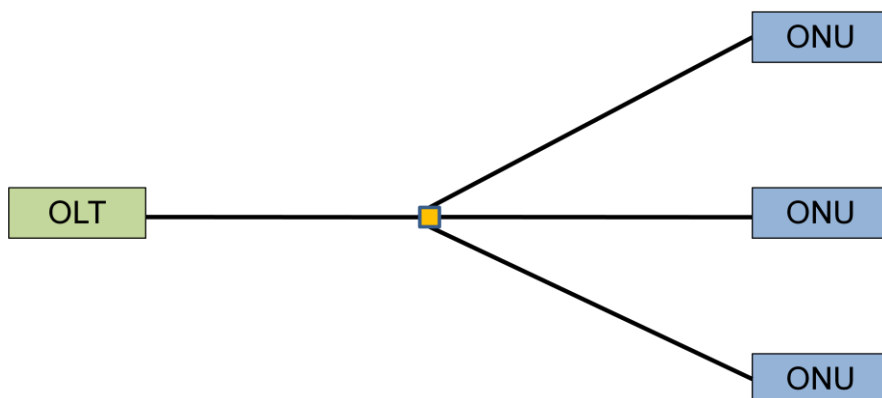


Figura 5. Topologia em árvore.

Nas próximas seções serão apresentadas as técnicas de acesso múltiplo mais utilizadas em redes PON.

2.1.3 TÉCNICAS DE ACESSO MÚLTIPLO

As técnicas de acesso múltiplo são utilizadas para gerenciar o envio de pacotes das ONUs ao meio de transmissão no sentido *upstream*. Este controle é necessário porque as ONUs devem compartilhar a mesma fibra óptica. As técnicas mais utilizadas são TDMA, WDMA e OCDMA [24], [26].

2.1.3.1 TDMA

A técnica de acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA) divide a largura de banda total do enlace em vários canais. A distribuição da banda por esses canais é feita pela atribuição de um intervalo de tempo, denominado *time slot*. A transmissão dos quadros *upstream* de diferentes ONUs é feita em intervalos de tempos definidos, alcançando a OLT de forma seqüencial. Esta sincronização é necessária para evitar colisões nas transmissões. Assim deve-se considerar todos os atrasos referentes à propagação do sinal de cada ONU até a OLT. O controle da transmissão geralmente é realizado na OLT, indicando o instante em que a ONU deve enviar seus dados. Como este esquema utiliza o mesmo comprimento de onda para a transmissão, é necessário apenas um tipo de transceptor para todas as ONUs, facilitando a operação e manutenção do sistema e, conseqüentemente, diminuindo os custos da implementação [23], [25].

2.1.3.2 WDMA

O esquema de acesso múltiplo por divisão de comprimento de onda (WDMA - *wavelength division multiple access*) permite compartilhar o meio (fibra óptica),

disponibilizando um comprimento de onda diferente para cada ONU. Desta forma, todas as ONUs podem transmitir pacotes simultaneamente na mesma direção utilizando toda largura de banda disponível, sem a necessidade de compartilhamento. Ao contrário do TDMA, que necessita de algoritmos para a sincronização na transmissão *upstream*, o WDMA é assíncrono. Nesta técnica, cada ONU deve operar com um comprimento de onda específico, e cada nova ONU adicionada deve operar em um comprimento de onda diferente dos que já foram registrados. Além disso, a OLT deve estar equipada com um conjunto de transmissores [26], [27].

2.1.3.3 OCDMA

Na técnica de acesso múltiplo por divisão de código (OCDMA) todos os usuários podem transmitir ao mesmo tempo, utilizando toda a faixa de frequência disponível e a distinção dos usuários ocorre por meio de códigos ópticos específicos. As características desta técnica são: a simplificação do gerenciamento e o controle da rede, pois não necessita de mecanismos de controle de acesso ao meio (acesso assíncrono); possibilidade de inserção simultânea de vários usuários, e o aumento da segurança em relação às redes supracitadas. No entanto, há interferência de acesso múltiplo (MAI – *multiple access interference*), gerada pelos outros usuários sobre o código do usuário de interesse. Esta degradação é mais severa à medida que o número de usuários aumenta [28].

2.2 PADRÕES DE REDES PON

As redes PON foram propostas para oferecer serviços de banda larga para os usuários finais. Com o decorrer do tempo, estas redes evoluíram, tendo suas taxas de transmissão aumentadas e novos padrões definidos pelo ITU-T e IEEE. A seguir, serão apresentados os principais Padrões PON [2], [29].

2.2.1 APON/BPON

Em junho de 1995, um consórcio de mais de 20 operadores de telecomunicações em todo o mundo desenvolveu uma especificação e definiu um sistema de comunicação capaz de suportar uma vasta gama de serviços. Esta iniciativa, conhecida como *Full Services Access Network* (FSAN) [30], especificou a APON (ATM PON), utilizando ATM (*asynchronous transfer mode*) como protocolo da camada MAC (*media access control*). O nome APON, em referência ao protocolo ATM, poderia induzir usuários a acreditar que apenas serviços

baseados em ATM poderiam ser suportados, e a terminologia foi trocada para BPON (*Broadband PON*). Em 2001, a União Internacional das Telecomunicações (ITU) definiu o padrão G.983 [31] para a rede BPON. Este primeiro padrão especifica a arquitetura BPON com taxa de transmissão assimétrica de 622 Mbps *downstream* e 155 Mbps *upstream* e simétrica de 155 Mbps [32]. Em 2002, esta especificação foi melhorada, aumentando a taxa de transmissão simétrica para 622 Mbps [33]. Os padrões para BPON especificam desde a camada física até as tarefas de operação, administração, manutenção e o provisionamento (*operation, administration, maintenance and provisioning - OAM&P*) [34].

2.2.2 EPON

Em novembro de 2000, a rede EPON foi especificada pelo grupo de trabalho IEEE 802.3ah [35]. Este grupo, denominado Ethernet na primeira milha (*Ethernet in the first mile - EFM*), foi designado para ampliar a aplicação de Ethernet às redes de acesso. O intuito era utilizar as características de baixo custo e simplicidade da arquitetura Ethernet para possibilitar a utilização de tecnologia em redes PON. A EPON transporta os dados encapsulados em quadros Ethernet, que facilita o transporte de pacotes IP e a interoperabilidade entre as LANs Ethernet instaladas. Este padrão foi concluído em junho de 2004 com a especificação da taxa máxima de transmissão 1 Gbps.

Atualmente, o IEEE criou um novo grupo de trabalho chamado P802.3av [36] para definir a camada física que permita operar em taxas de transmissão de 10 Gbps. Esta iniciativa foi proposta para atender a futura demanda de tráfego da Internet.

2.2.3 GPON

Em abril de 2001, o grupo FSAN iniciou um projeto para especificar um padrão mais flexível que suportasse diferentes tipos de tráfegos e taxas de transmissão mais elevadas em redes PON. O resultado deste esforço veio com a padronização da série de recomendações G.984.x desenvolvida pelo ITU-T que especifica a rede GPON [4]. Esta rede oferece diferentes taxas de transmissão nos dois sentidos, *downstream* e *upstream*, dispondo das seguintes possibilidades de configuração: no sentido *downstream* a transmissão pode ser 1,25 Gbps ou 2,5 Gbps; na *upstream* 0,155 Gbps, 0,622 Gbps, 1,25 Gbps ou 2,5 Gbps, sendo possíveis quaisquer combinações entre elas, exceto 1,25 Gbps para *downstream* e 2,5 Gbps para *upstream* (a combinação mais utilizada é a 2,5 Gbps para *downstream* e 1,25 Gbps para *upstream*) [5]. O método de encapsulação de pacotes GPON é o GTC que pode conter pacotes

GEM, que tem como base o protocolo genérico de formatação de quadros (*generic framing protocol* - GFP) [37] e encapsula quadros Ethernet e TDM, e células ATM [5]. O sistema GPON pode suportar tanto o atendimento de tráfego em rajada (*variable bit rate* - VBR) quanto tráfego em taxa de bit constante (*constant bit rate* - CBR), combina as vantagens de QoS do ATM e utiliza a eficiência de cabeçalho do seu padrão [5], [38]. Atualmente, algumas empresas estão implementando comercialmente redes GPON com taxa de transmissão de 10 Gbps [39]. As principais características das redes PON são listadas na Tabela 1 [40].

Tabela 1. Principais características das redes APON/BPON, EPON e GPON [40].

| Arquiteturas | APON/BPON | EPON | GPON |
|---------------------------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Padrão | ITU-T G.983 | IEEE 803.ah | ITU-T G.984 |
| Tamanho do pacote de dados | 53 bytes | Variável de 64 bytes até 1518 bytes | Variável de 53 bytes até 1518 bytes |
| Quadro | ATM | Ethernet | GFP/ATM |
| Largura de banda máxima | 622 Mbps | 1 Gbps | 2,5 Gbps. |
| 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 |
| Eficiência | 72% | 49% | 94% |

A quantidade de dados (*payload*) enviados nos pacotes é um dos fatores determinantes para avaliar o desempenho da rede. Quanto mais dados forem enviados e se houver menor troca de mensagens na rede, maior será o aproveitamento da banda. A eficiência da rede está relacionada com a utilização da banda. Como podemos observar na Tabela 1, a rede GPON possui maior eficiência que as demais redes PON devido ao cabeçalho e à forma de envio das mensagens *downstream* e *upstream* [40], [41].

CAPÍTULO 3

REDE GPON

As redes GPON destacam-se pela eficiência na transmissão (proporcionada pela estrutura dos pacotes) e flexibilidade no transporte de diferentes tráfegos de dados. Este capítulo aborda a geração do tráfego, a fragmentação e transmissão de pacotes e sua estrutura nos sentidos *upstream* e *downstream*. As especificações técnicas apresentadas neste capítulo são encontradas na norma ITU-T G.984.3 [5].

3.1 TRANSMISSÃO E ESTRUTURAS DOS PACOTES GPON

A transmissão no sentido *downstream* é realizada por meio de difusão (*broadcast*). As ONUs recebem o pacote, retiram as informações do cabeçalho (quantidade de *time slot*, tipo de tráfego a ser enviado, sincronização etc.) e encaminham as informações da carga útil (*payload*) para os usuários. No sentido *upstream*, os dados do usuário são encapsulados pelo GTC e a transmissão é realizada utilizando o acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA), compartilhando o meio de transmissão entre as ONUs. A Figura 6 ilustra a transmissão no sentido *upstream* do padrão GPON. Nesta figura o tráfego de cada ONU é composto pelo cabeçalho e *payload*. O bloco PLOu (*physical layer overhead upstream*) é utilizado para a sincronização dos pacotes; o bloco PLOAMu (*physical layer operations, administration, and maintenance upstream*), para o gerenciamento da rede; o bloco PLSu (*power leveling sequence upstream*), para medir a potência óptica da ONU; o bloco DBRu (*dynamic band report upstream*), para informar a quantidade de tráfego contido nos T-CONTs.

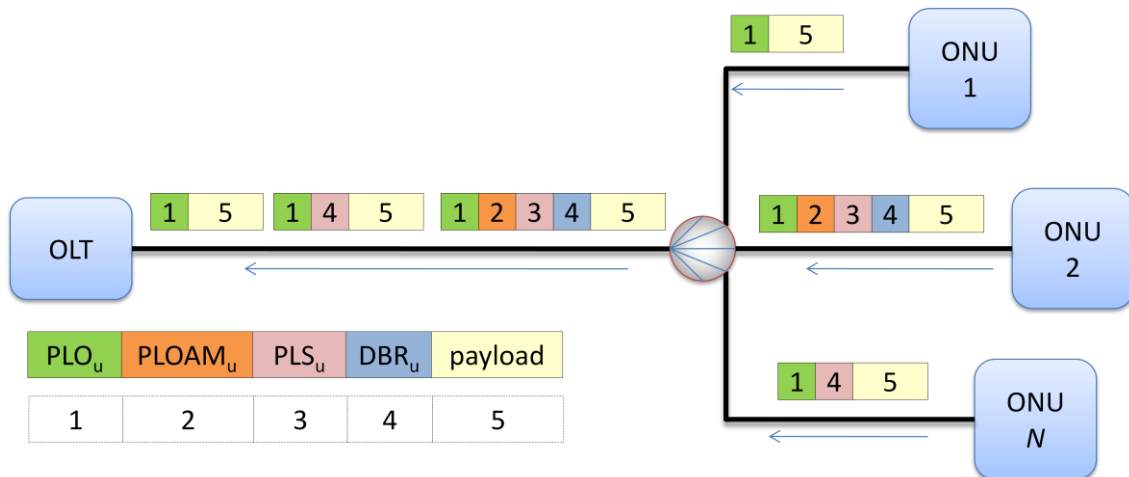


Figura 6. Exemplo de transmissão de tráfego no sentido *upstream* em padrão GPON e blocos de controle. No bloco DBR_u a ONU informa o status da fila, solicitando *time slots*. OLT: *Optical line terminal*; ONU: *Optical network unit*; PLO: *Physical layer overhead* (obrigatório em todas as transmissões); PLOAM: *Physical layer operations, administration, and maintenance*; PLS: *power leveling sequence*; DBR: *dynamic band report*; u: *upstream*.

A Figura 7 mostra o quadro GTC (*GPON transmission convergence*) *upstream* com detalhes de composição dos blocos de funções. O bloco PLO_u é obrigatório em toda transmissão *upstream*, sendo composto de: preâmbulo, delimitador e cabeçalho do pacote contendo três campos correspondentes às informações referentes à chegada de pacotes na ONU. O preâmbulo é responsável pelo sincronismo dos quadros; o delimitador é um padrão de bits único que indica o início de cada quadro e também pode ser utilizado para a sincronização de byte; o BIP (*bit interleaved parity*) é utilizado para estimar a taxa de erro de bit; a ONU-ID contém um conjunto de bits únicos para identificar cada ONU; o campo Ind é utilizado para informações sobre o uso de FEC (*forward error correction*). O preâmbulo e o delimitador têm o número de bytes variáveis que são representados, na Figura 7, com as letras ‘a’ e ‘b’ respectivamente. O Bloco PLOAM_u é responsável pela operação, administração e gerenciamento da camada física no sentido de *upstream*, sendo composto pelos campos: ONU-ID, mensagem-ID, mensagem de dados e CRC (*cyclic redundancy check*). O primeiro campo contém o endereço da ONU; a mensagem-ID indica o tipo da mensagem; a mensagem de dados é utilizada para o gerenciamento dos pacotes; o CRC composto por 1 byte para detecção e correção de erros, protegendo cada estrutura de acesso. O bloco PLS_u fornece à OLT informações sobre potência de sinal para controle do laser. O bloco DBR_u contém o campo DBA que é usado para informar à OLT a situação das filas das ONUs, na qual a alocação de banda se baseia e o campo CRC.

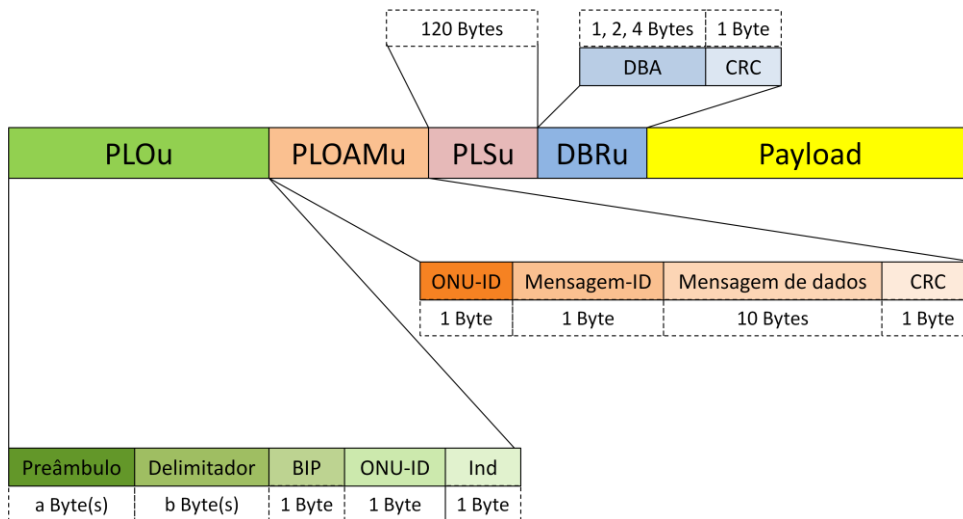


Figura 7. Quadro GTC *upstream*. PLO: *physical layer overhead*; PLOAM: *physical layer operations, administration, and maintenance*; PLS: *power leveling sequence*; DBR: *dynamic bandwidth report*; BIP: *bit interleaved parity*; ID: *identificador*; DBA: *dynamic bandwidth assignment*; CRC: *cyclic redundancy check*; u:*upstream*.

O quadro *downstream* é composto pelos blocos PCBd e *payload*. O PCBd (*physical control block downstream*) é composto por figura de sincronismo (PSync – *physical synchronization*); identificador (*Ident*) de 4 bytes; mensagem PLOAMd (*physical layer operations, administration and maintenance downstream*) de 13 bytes para informação de gerenciamento, como alarmes; BIP (*bit interleaved parity*) de 1 byte para a estimação da taxa de erro de bit; mapa de largura de banda (US BW Map), contendo todas as alocações para um quadro *upstream* com 8 bytes para cada ONU, sendo N o número de ONUs; 4 bytes para indicador de comprimento de *payload* (PLend), que indica o comprimento do mapa de largura de banda e o tamanho do segmento ATM. O PLend é enviado duas vezes para garantir robustez. A Figura 8 ilustra o quadro *downstream*.

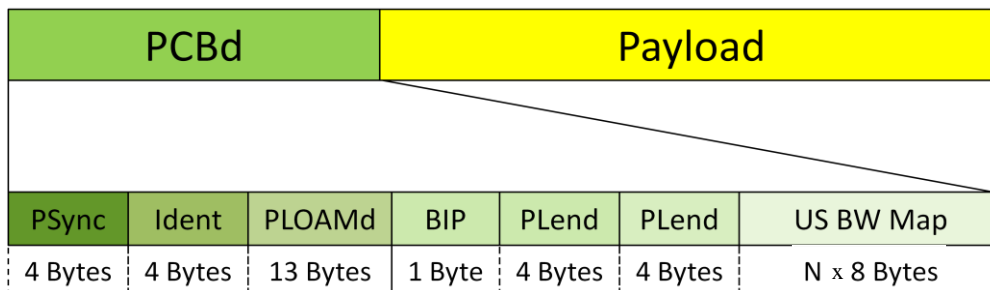


Figura 8. Quadro *downstream*. PSync: *Physical Synchronization*; Ident: *identificador*; PLOAM: *physical layer operations, administration, and maintenance*; BIP: *Bit interleaved parity*; PLend: *comprimento do payload*; US BW Map: *mapa de largura de banda*; d: *downstream*.

A Figura 9 mostra um exemplo com quadros *downstream* e *upstream*. O quadro

downstream é transmitido no instante t_1 e o quadro *upstream* no instante t_2 , que depende do intervalo de ida e volta e tempo de propagação. A transmissão *upstream* se refere às ONUs 1, 2 e 3. Cada ONU irá identificar os campos Alloc-ID, Flag, *start*, *stop* e CRC destinados a ela seguindo a sequência contida no mapa de banda. A fila de uma ONU é identificada pelo campo Alloc-ID de 12 bits. O campo Flag de 12 bits contendo informações referentes a transmissão. Os campos *start* e *stop*, ambos com 2 bytes, indicam o intervalo do *time slot* a ser transmitido pela ONU no T-CONT contido no campo Alloc-ID. O mapa de banda, iniciando por Alloc-ID e encerrando pelo par *start-stop*, é protegida por CRC de 1 byte.

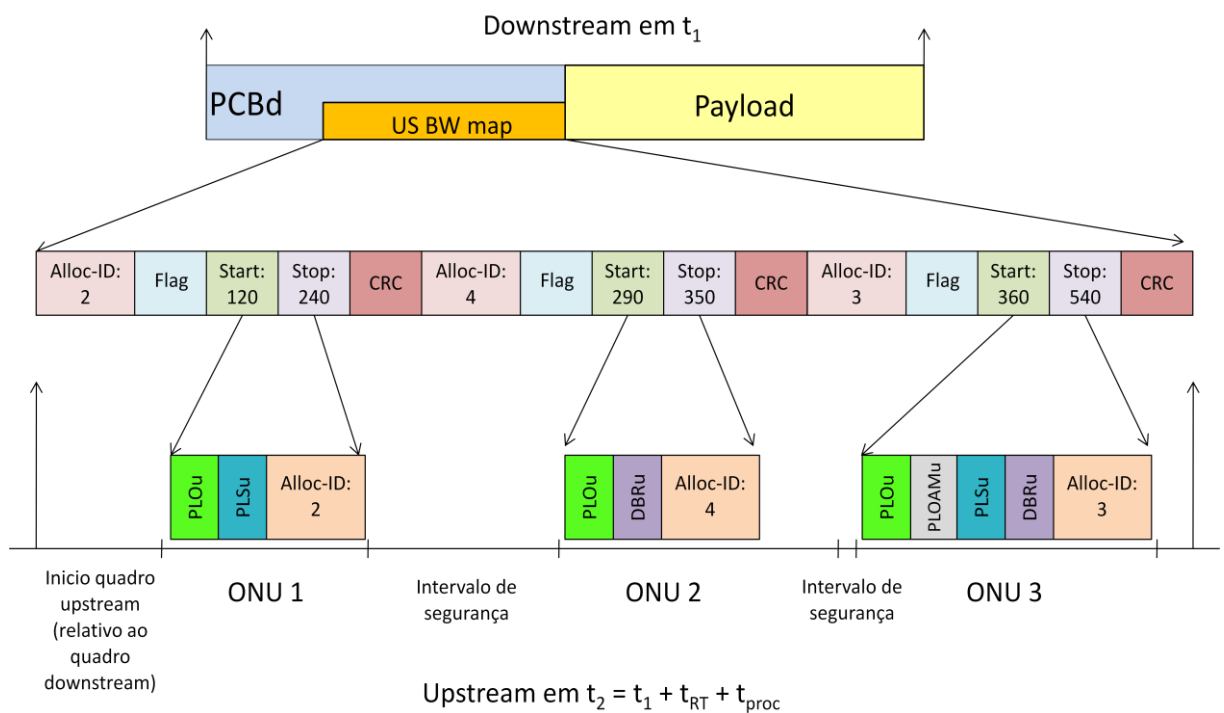


Figura 9. Atuação do MAC (*Media access control*). PCB: *physical control Block*; USBW: *upstream bandwidth*; Alloc – ID: especificação de fila de uma ONU; CRC: *cyclic redundancy check*; PLO: *physical layer overhead*; PLOAM: *physical layer operations, administration, and maintenance*; PLS: *power leveling sequence*; DBR: *dynamic bandwidth report*; t_{RT} : intervalo de ida e volta (RTT); t_{proc} : tempo de processamento; u: *upstream*; d: *downstream*.

No GPON o encapsulamento dos dados é realizado utilizando o GTC que suporta os tráfegos Ethernet e TDM, que são encapsulados pelo GEM, e o ATM. A Figura 10 mostra a descrição de um quadro GTC [42].

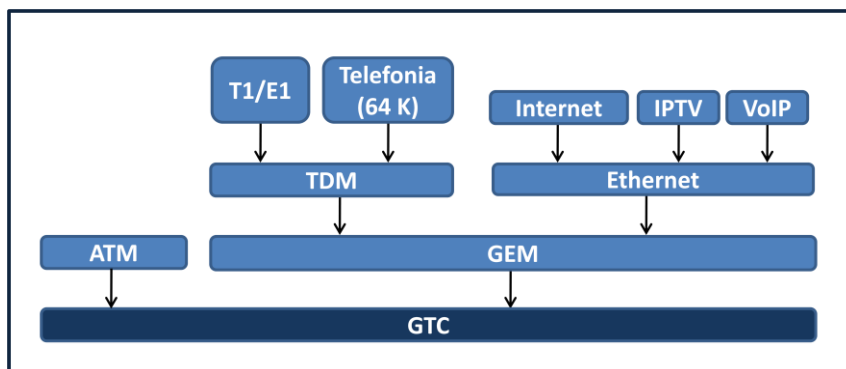


Figura 10. Quadro GTC (GPON *transmission convergence*).

Além de utilizar o GTC, o GPON utiliza também o conceito de fragmentação. Assim, os pacotes podem ser divididos em partes menores ocupando todo o *time slot*, aumentando a eficiência da rede e utilizando toda banda disponível. Cada pacote de dados de usuário pode ser dividido em um número de fragmentos. No cabeçalho GTC o campo *Fragment* é utilizado para indicar o número do pacote fragmentado e o PTI (*payload type indicator*) é usado para indicar o fragmento que contém o final de cada pacote. A Figura 11 mostra a fragmentação do pacote.

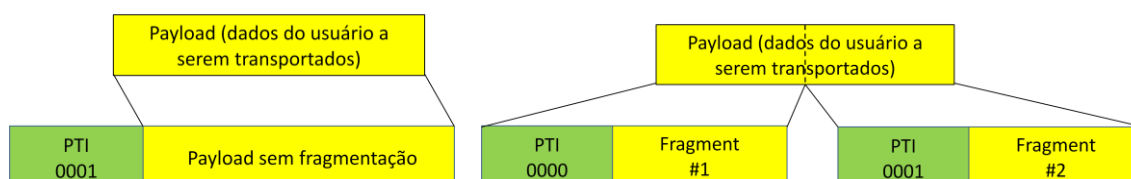


Figura 11. Fragmentação do pacote; PTI (*Payload Type Indicator*).

3.2 TAMANHO DOS PACOTES EM PADRÃO GPON

A duração do quadro, nos sentidos *downstream* e *upstream*, é 125µs. Para enviar os pacotes durante este intervalo, o tamanho máximo para cada taxa (1,24416 e 2,48832 Gbps) é 19440 e 38880 bytes, respectivamente. No bloco US_BW_mapa está indicada a quantidade de bytes que cada ONU pode transmitir. De acordo com estas informações, os pacotes *upstream* são organizados e enviados para a OLT.

A banda destinada às ONUs pode ser arbitrada segundo o exemplo de [38]. Em uma rede GPON com 16 ONUs (fazendo uso de apenas um T-CONT e utilizando uma taxa de 1,24416 Gbps), o tamanho de cada *time slot* será 19440 bytes, disponíveis para toda a transmissão *upstream*. Assim, cada ONU poderá transmitir 1215 bytes em cada transmissão

upstream, dos quais 17 bytes são utilizados pelo cabeçalho e 1198 bytes são utilizados para transmissão de conteúdo (*payload*).

3.3 MODELAGEM DE TRÁFEGO

Uma das dificuldades encontradas nas simulações de redes é a modelagem do tráfego. O modelo clássico que tem sido utilizado é o descrito pela distribuição de Poisson, apropriado para tráfego de voz e características das redes comutadas por circuito [43]. A distribuição de Poisson exhibe dependência de decaimento curto (*SRD – short-range dependence*). Entretanto, medidas de tráfego feitas em redes comutadas por pacotes mostraram que este tipo de distribuição não se aplica, mas sim aquelas que exibem dependência de decaimento longo (*LRD – long-range dependence*) e apresentam grau de auto-similaridade [44].

Algumas distribuições estatísticas, como a de Pareto, exibem comportamento LRD. A distribuição exhibe eventos (população) altamente prováveis, seguidos por eventos de baixa probabilidade de ocorrência, decrescendo gradual e assintoticamente. Os eventos no final da distribuição exibem probabilidade muito baixa de ocorrer. A distribuição do tamanho dos pacotes TCP está de acordo com a distribuição de Pareto, pois a maioria dos pacotes é pequena e poucos são grandes.

Este tipo de distribuição de probabilidade exhibe característica associada ao comportamento LRD, a auto-similaridade. Um objeto auto-similar é exata ou aproximadamente similar a uma parte de sua composição, ou seja, o objeto completo é parecido com uma ou mais de suas partes. Os padrões de tráfego de pacotes exibem esta propriedade. Para estes casos, o uso de modelo baseado em distribuição de Poisson não é apropriado. Assim, o modelo de tráfego auto-similar é utilizado para simular tráfego de rajadas. O tráfego em redes de acesso operando sob padrões GPON e EPON é descrito por este modelo, caracterizado por períodos ON (rajadas) e OFF (ausência de rajadas) [12]-[22]. Este tipo de tráfego exhibe auto-similaridade, sendo o grau dado pelo parâmetro Hurst [12]-[22], [43], [44]. Em nossas implementações este fator é 0,8. O Apêndice A aborda mais detalhadamente a distribuição de Poisson e o tráfego auto-similar.

CAPÍTULO 4

ALOCAÇÃO DE BANDA EM GPON

A implantação de redes de acesso padrão GPON tem como premissas o oferecimento de banda larga e qualidade de serviço (QoS). Algumas previsões indicam que em 2010 cerca de 60% das residências nos EUA terão à sua disposição HDTV [1]. Se aplicações nos padrões HDTV e SDTV derivarem para as redes de acesso, a capacidade *downstream* (2.488 Mbps) pode ser esgotada em pouco tempo, pois um canal SDTV requer aproximadamente 3 Mbps e um canal HDTV, 18 Mbps, se for utilizada codificação MPEG-2 [45]. No sentido *upstream* o perfil do tráfego pelo uso de aplicações P2P e de sites que operam com *upload* (como Youtube e Flickr), irá alterar as características das redes de acesso de assimétrica para quase simétrica em um futuro próximo. Assim, a garantia de QoS torna-se fator determinante, porque os serviços oferecidos tendem a ser interativos. Ainda, a exigência de proteção na infraestrutura da rede e o desempenho de serviços TDM (*time division multiplexing*) exigem baixo nível de atraso e baixa perda de pacotes. A Tabela 2 lista os requisitos de banda de alguns serviços.

Tabela 2. Cenário de requisito de banda para alguns serviços [1].

| Serviços | Downstream (bps) | Upstream (bps) |
|------------------------------------|---------------------|-------------------|
| HDTV (vários canais) | 30 M | 50 k |
| SDTV (vários canais) | 8 M | 50 k |
| Jogos online | 10 M | 10 M |
| Vídeo conferência / aprendizado | 3 M | 3 M |
| VoIP | 110 k | 110 k |
| HSI (<i>High Speed Internet</i>) | 5 M | 2 M |
| Navegação multimídia | 8 M | 2 M |
| Trabalho em casa | 4 M | 2 M |
| Total (estatística) | 68 M | 19 M |

O tráfego na Internet e outros serviços continuará aumentando, como é exemplificado na Figura 12 [46], e um mecanismo de gerenciamento eficiente de largura de banda é cada vez mais importante para fornecer aos usuários qualidade de serviço. Assim, é necessário que as operadoras de telecomunicações utilizem em suas OLTs eficientes algoritmos de alocação de

banda que gerenciem toda a rede com intuito de minimizar o atraso e evitar o desperdício de banda.

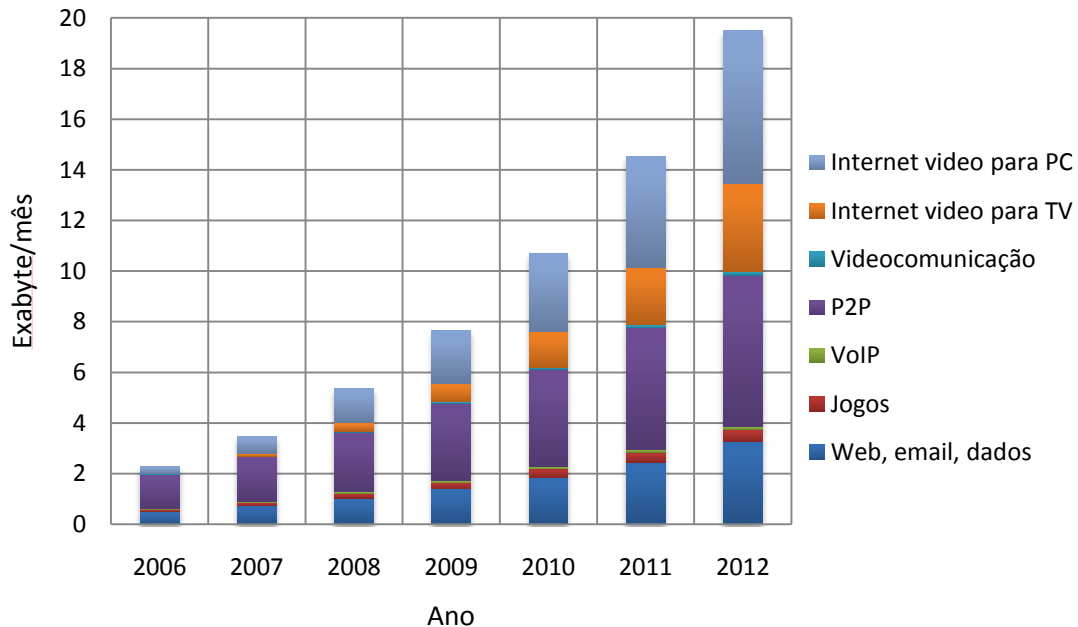


Figura 12. Crescimento do tráfego da Internet; Exabyte: 10^{18} [46].

4.1 ALGORITMOS DE ALOCAÇÃO DE BANDA

Um algoritmo de alocação de banda atua com base em um conjunto de critérios a fim de alocar *time slots* para que as ONUs transmitam seus respectivos quadros de tráfego, gerenciando o meio compartilhado e evitando colisões. A alocação de banda pode ser classificada em estática ou dinâmica e o seu desempenho é avaliado pelo atraso de pacote (latência), pela variação do atraso (*jitter*) e pela probabilidade de perda de pacote.

A implementação mais simples é a que aloca *time slots* fixos para as ONUs. Entretanto, se os *time slots* atribuídos são insuficientes para cobrir os requisitos de largura de banda da ONU (que devem aguardar para serem transmitidos) haverá aumento do atraso de pacotes. Por outro lado, se os *time slots* forem subutilizados haverá desperdício de banda. Esta implementação é conhecida como alocação estática de banda.

Na alocação dinâmica de banda (DBA – *dynamic bandwidth allocation*) o princípio é alocar banda aos elementos da rede que estejam ativos e reduzir *time slots* quando não há dados a transmitir, disponibilizando-os para as ONUs que necessitam. O desafio para o DBA é saber a quantidade de bytes que aguardam transmissão nas ONUs.

No caso de esquema estático, o controle (operadora) dispõe de visibilidade limitada sobre tráfego no canal *upstream*, resultando em latência elevada e perda excessiva de pacotes, reduzindo a eficiência e provocando perda de receita. Se o uso da banda for ineficiente, não será possível ampliar o número de ONUs atendidas. Estas limitações são superadas por algoritmos que atuam de forma dinâmica, alocando banda de acordo com a necessidade de cada ONU. Com isso, a latência e a perda de pacotes podem ser reduzidos. A Figura 13 e a Figura 14 mostram simplificadaamente as alocações estática e dinâmica de banda, respectivamente.

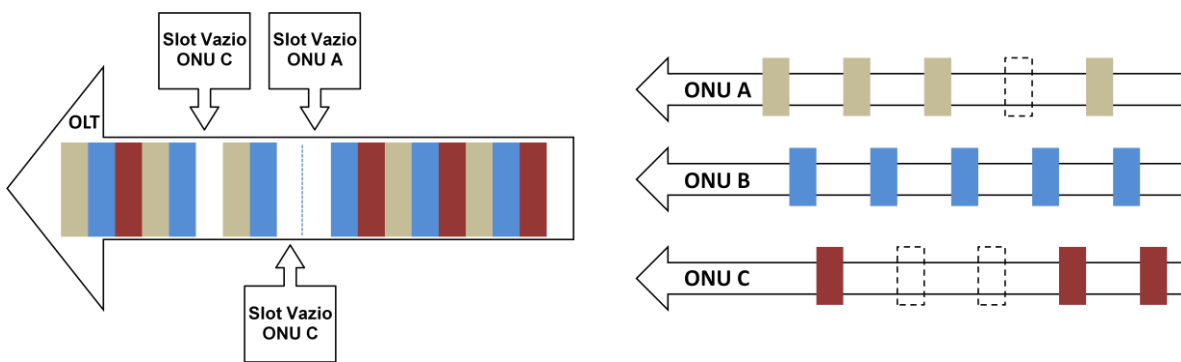


Figura 13. Alocação estática de banda. Se as ONUs não possuem dados a transmitir (quadrado branco na figura) os *time slots* alocados a elas ficam indisponíveis para serem utilizados por outras ONUs. A operadora de serviços não pode ampliar o número de ONUs porque a banda utilizada de forma ineficiente não permite.

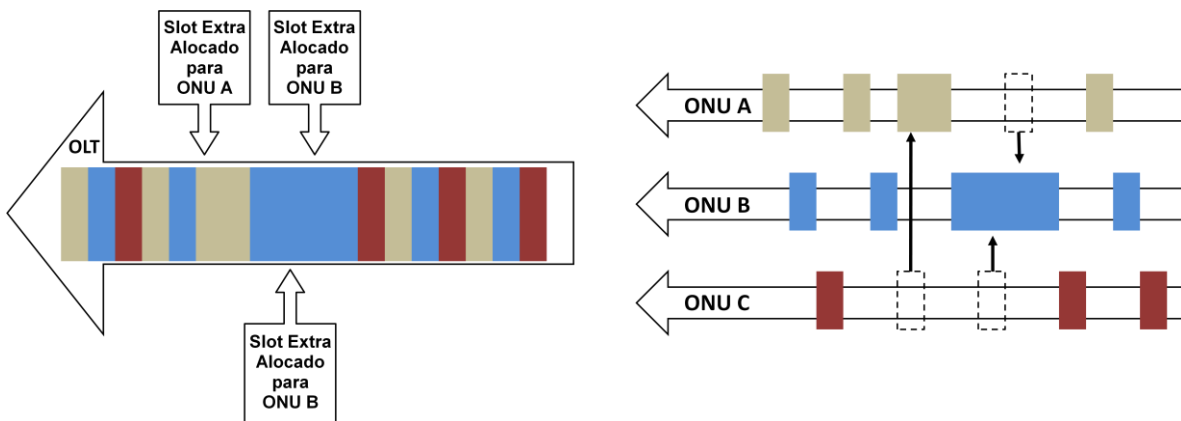


Figura 14. Alocação dinâmica de banda. Em sequência, o primeiro (da esquerda para a direita) *time slot* não utilizado pela ONU C é alocado para a ONU A; o segundo *time slot* não utilizado pela ONU C é alocado para a ONU B; O *time slot* não utilizado pela ONU A é alocado para a ONU B. Desta forma, a transmissão *upstream* não exibe *time slot* desocupado, aumentando a eficiência da rede.

Vários processos são realizados com a finalidade de coordenar a transmissão de dados entre a OLT e as ONUs. Conforme mostrado na Figura 15, para começar a transmissão na ONU a OLT enviará um pacote *downstream* com o mapa de banda de todas as ONUs contendo o instante que a ONU deverá iniciar a transmissão. Quando a mensagem chega à

ONU, os campos *start* e *stop* são verificados para informar o intervalo de tempo necessário para transmitir seus pacotes, e o campo Alloc-ID para verificar qual tráfego de contêiner deverá ser transmitido. Nas transmissões *upstream*, as redes GPON utilizam o campo DBA, contido no bloco DBRu, no início de cada *time slot* para enviar a solicitação de banda para a OLT. A transmissão das ONUs forma o quadro *upstream*. Este processo foi ilustrado na Figura 9. Uma vez que o quadro *upstream* é recebido pela OLT, ele é repassado para o módulo DBA, que é responsável pela alocação de largura de banda. Adicionalmente, a OLT recalculará o RTT da ONU utilizando a informação do bloco PLOu. O RTT experimenta atrasos de propagação, que é proporcional ao comprimento da fibra entre a ONU e o OLT. O RTT varia para cada ONU. O módulo DBA deverá programar os *time slots* para a ONU de tal forma que o quadro *upstream* desta chegue à OLT imediatamente depois do quadro da ONU anterior, mantendo somente um pequeno intervalo de tempo entre as transmissões, o tempo de guarda. A ordem de transmissão de informação das ONUs é feita de forma cíclica, denominando-se **ciclo de interrogação** ao intervalo de tempo em que todas as ONUs terão transmitido uma vez à OLT [47].

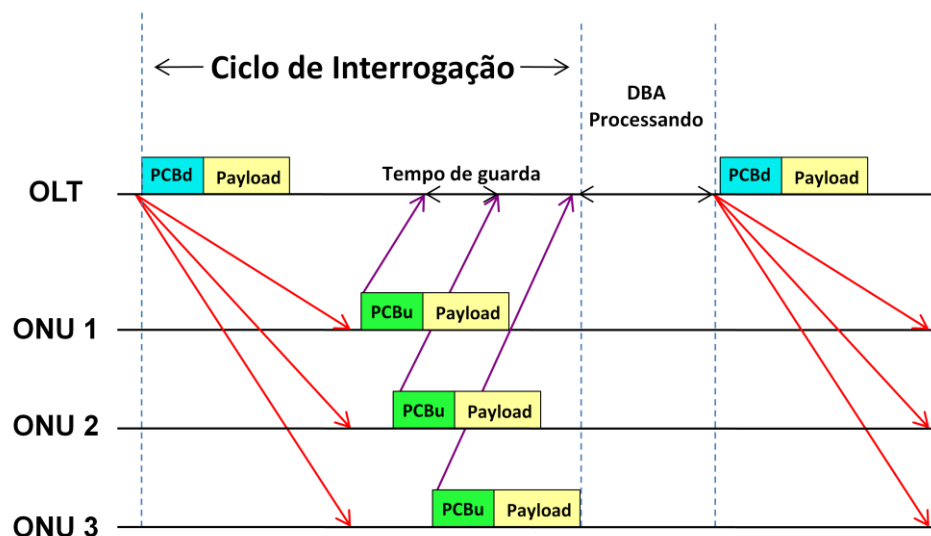


Figura 15. Fluxo de mensagens *upstream* e *downstream* em GPON.

4.1.1 CLASSE DE SERVIÇO, QUALIDADE DE SERVIÇO E CONTRATO DE SERVIÇO

Os vários tipos de tráfegos, como voz, vídeo, dados, correio eletrônico e navegação em páginas Web, são classificados em ordem de prioridade para serem transmitidos. No GPON os T-CONTs são os indicadores de CoS. Em caso de congestionamento, o protocolo

MAC utiliza a informação de CoS para manter em fila ou descartar pacotes, caso seja necessário. A classificação indica a ordem de prioridade de transmissão, conforme ilustra a Figura 16, e não distingue ONUs, mas sim o tipo de tráfego.

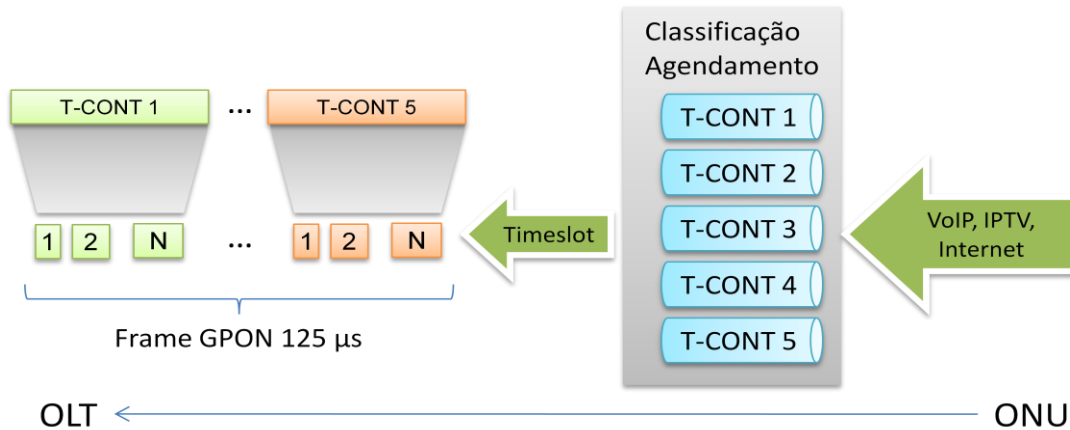


Figura 16. Esquema da operação classificação de tráfego das ONUs em T-CONTs e agendamento de transmissão no sentido *upstream*.

O ITU-T 984.3 [5] especifica 5 T-CONTs para o padrão GPON:

T-CONT 1: Alocação fixa de banda; adequado para aplicações CBR (*constant bit rate*) que utilizam taxas fixas de transmissão e que sejam sensíveis a atraso;

T-CONT 2: Alocação garantida de banda; adequado para tráfego VBR (*variable bit rate*) com taxa média bem definida e com pouca sensibilidade a atraso;

T-CONT 3: Alocação garantida de banda com possibilidade de disputar mais banda; adequado para tráfego de rajada e que necessita de banda mínima garantida;

T-CONT 4: Alocação de banda do tipo *best-effort*; adequado para tráfego de rajada insensível a atraso;

T-CONT 5: Serviços combinados de todos ou de alguns T-CONTs.

O mecanismo CoS não garante qualidade de serviço, como atraso máximo ou banda. A garantia destas especificações é dada pela QoS, que é um conjunto de requisitos de qualidade de transmissão como banda, atraso, *jitter*, probabilidade de perda de pacote e taxa de erro. O protocolo que implementa QoS pode utilizar informações de CoS para escolher recursos que garantam qualidade de transmissão. No entanto, para que isto seja feito, os provedores especificam (por meio do SLA) os serviços, prioridades, responsabilidades, garantias e penalidades. As cláusulas do SLA incluem a identificação e definição das necessidades do usuário, fornecimento de estrutura (*framework*) para estabelecimento do acordo e eliminação de expectativa irrealista. O SLA especifica o nível de serviço,

desempenho e operação. O acordo é baseado na qualidade de serviço que o usuário recebe e não em condições que o provedor entrega o serviço. As especificações constantes do QoS normalmente fazem parte do acordo.

A banda alocada para cada usuário é baseada na CIR (*committed information rate*), PIR (*peak information rate*) e EIR (*excess information rate*) que são conceitos definidos pelo ITU-T G.984.3 [5]. A CIR é a banda contratada e garantida. Em qualquer instante e em operação normal, a banda disponível destinada a um usuário nunca está abaixo deste valor. A soma da CIR alocada para os usuários geralmente é no máximo igual à capacidade do enlace (PIR). A PIR é a banda que uma conexão pode dispor acima da CIR. A PIR é concedida a um ou mais usuários se houver banda disponível depois que todas as CIRs são atendidas. A PIR alocada a um ou a todos os usuários não pode exceder a capacidade do enlace. A EIR é a diferença entre a PIR e a CIR. Esta é a banda disponível para alocação dinâmica depois que todos os usuários tenham sido atendidos pela CIR. A Figura 17 ilustra os três conceitos.

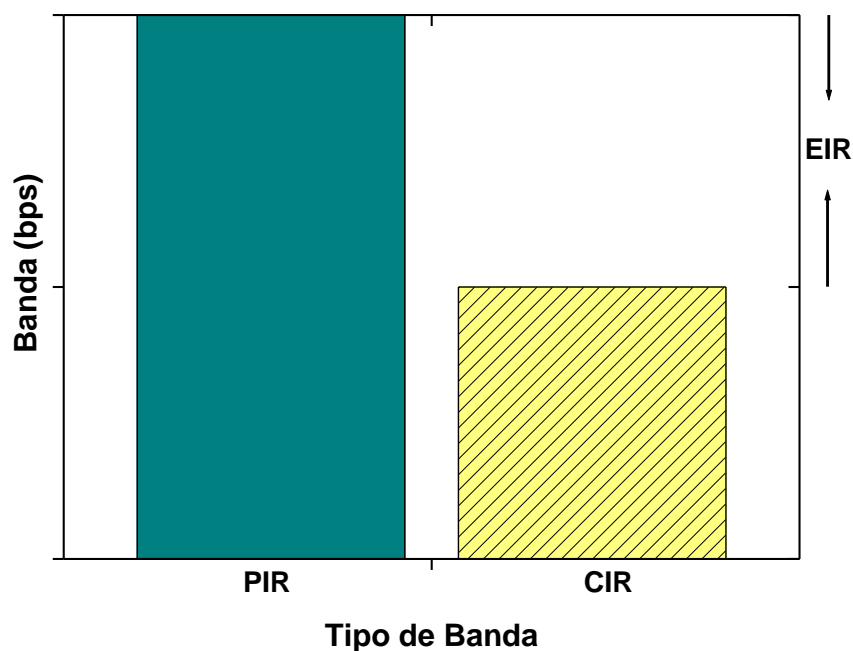


Figura 17. Banda garantida (CIR), de pico (PIR) e banda não utilizada (EIR).

Neste trabalho utilizamos especificações mínimas para CoS, QoS e SLA. A CoS é dada pelos T-CONTs do padrão GPON, a QoS é a garantia de alocação de banda garantida (CIR) e o SLA fornece a prioridade para alocação da banda não utilizada (EIR), única especificação adotada.

Na seção seguinte apresentamos a validação da simulação computacional utilizando o algoritmo DMB (*dynamic minimum bandwidth*) proposto em [13].

4.2 ALGORITMO DMB (*DYNAMIC MINIMUM BANDWIDTH*)

O algoritmo DMB foi proposto por Chang, Kourtessis e Senior [12], [13] e é baseado em SLAs, com garantia de banda mínima, cuja distribuição entre os SLAs é realizada de acordo com fatores de ponderação. Assim, a característica deste algoritmo que diferencia os SLAs é a distribuição da banda mínima. A banda não utilizada é realocada para as ONUs, independentemente dos SLAs. Esta alocação é dinâmica e depende da banda excedente e do estado das filas de tráfego das ONUs. O algoritmo DMB é implementado em duas etapas. A banda mínima para cada SLA é estipulada no primeiro estágio e a banda não utilizada, no segundo.

No primeiro estágio, o algoritmo destina banda mínima para o t -ésimo SLA [13],

$$B_{\min}^t = B_{\text{básica}} + B_{\text{extra}}^t \quad (1)$$

na qual $B_{\text{básica}}$ é a banda constante disponível para todas as ONUs, independentemente do SLA, e B_{extra}^t é a banda extra destinada às ONUs de acordo com o SLA,

$$B_{\text{extra}}^t = (B_{\text{total}} - kB_{\text{básica}})P_t \quad (2)$$

na qual $P_t = \frac{W_t}{\sum_{t=1}^3 W_t N_t}$, B_{total} é a taxa de bit máxima, 1 Gbps de acordo com [13]; k é o número

total de ONUs ativas; N_t é o número de ONUs com adesão ao t -ésimo SLA e W_t é a ponderação de prioridade de acesso ao meio compartilhado. A ponderação para cada SLA e a distribuição de banda mínima entre as ONUs dos SLAs são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3. Distribuição das ponderações do algoritmo DMB [13].

| SLA (t) | Ponderação (W) | ONUs | P_t | Prioridade | $B_{\text{básica}}$ (Mbps) | B_{extra} (Mbps) | B_{\min} (Mbps) | Total B_{\min} (Mbps) |
|----------------|-----------------------|---------|-------|------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------|----------------------------|
| 1 | 2 | 1 a 10 | 0,051 | Baixa | 34 | 23,38 | 57,38 | 573,8 |
| 2 | 3 | 11 a 15 | 0,077 | Média | 34 | 35,08 | 69,08 | 345,4 |
| 3 | 4 | 16 | 0,102 | Alta | 34 | 46,77 | 80,8 | 80,8 |
| Total | | | | | | | 1.000 | |

De acordo com esta distribuição adotada pelos autores de [13], toda banda de 1 Gbps é distribuída às ONU por meio da banda mínima. Assim, se uma ONU não utiliza parte da banda mínima, B_{\min} , esta parte é disponibilizada para utilização por ONUs que necessitam de banda extra, além da banda mínima. O algoritmo DMB realoca a banda não utilizada pelas ONUs de acordo com

$$B_{extra_alocada}^i = \frac{\sum_{j=1}^N B_{n\tilde{a}o_utilizada}^j}{\sum_{j=1}^N B_{extra_solicitada}^j} B_{extra_solicitada}^i \quad (3)$$

na qual $B_{extra_alocada}^i$ é a banda extra alocada à i -ésima ONU; $B_{n\tilde{a}o_utilizada}^j = B_{\min}^j - Q_j$, se $B_{\min}^j \geq Q_j$, é a banda não utilizada pela j -ésima ONU no estágio 1 do algoritmo; $B_{extra_solicitada}^j = Q_j - B_{\min}^j$ se $B_{\min}^j < Q_j$, é a banda extra solicitada pela j -ésima ONU; Q_j é o tamanho da fila da j -ésima ONU. A banda máxima alocada para a i -ésima ONU é

$$B_{max_alocada}^i = \min \left(\begin{array}{l} B_{\min}^i + B_{extra_alocada}^i \\ Q_i \end{array} \right) \quad (4)$$

Assim, o algoritmo DMB aloca banda mínima, B_{\min}^i , diferente para os três SLAs de acordo com (1) e (2). Especificadas as ponderações para cada SLA, a banda mínima é determinada e o valor não se altera se todas as ONUs estiverem ativas durante todo tempo. As simulações podem incluir aleatoriedade no número de ONUs ativas e o algoritmo determina a banda mínima para os SLAs em cada simulação. Assim, se uma ONU está inativa, a banda que seria utilizada por ela fica à disposição das ONUs ativas.

A banda extra alocada, $B_{extra_alocada}^i$, para a solicitação da i -ésima ONU é determinada por (3). O valor é a banda solicitada multiplicada por um fator que relaciona a banda não utilizada por todas as ONUs e a banda solicitada por todas as ONUs. Este fator pode ser menor, igual ou maior que a unidade. Se for igual, a i -ésima ONU recebe a banda que solicitou. Se for menor que 1, recebe menos banda do que solicitou e pode atender parcialmente sua fila. Se for maior que 1, o algoritmo DMB utiliza (4) para não alocar mais

do que foi solicitado. Notar que a distribuição de banda extra às ONUs não depende mais do SLA. Portanto, o algoritmo DMB considera os SLAs apenas ao atribuir a banda mínima. A alocação da banda não utilizada é realizada de acordo com a solicitação de cada ONU, independentemente do SLA a que ela está associada.

4.2.1 SIMULAÇÃO DO DMB

A simulação do algoritmo de alocação dinâmica de banda DMB utiliza os parâmetros de rede GPON mostrados na Tabela 4. Os SLAs estão especificados na Tabela 3.

Na Figura 18, é validado a simulação comparando as curvas de prioridade alta, média e baixa com os pontos retirados do gráfico do algoritmo DMB [13]. Para obter estes resultados, implementamos as equações de (1) a (4) e notamos que a simulação obteve resultados similares ao do algoritmo DMB.

A variação do atraso médio de pacote em função da carga oferecida por ONU é mostrada na Figura 18. Notamos para cargas elevadas, próximas de 100%, que os atrasos para os três SLAs tendem para valores próximos. A especificação de banda mínima entre os SLAs realizada via fator de ponderação é a responsável pelo equilíbrio do atraso.

As diferenças significativas entre atraso para os três SLAs ocorrem para valores médios de carga, entre 60 e 85%. Nesta faixa de carga a distribuição de banda mínima privilegia os SLAs com prioridades maiores.

Assim, o algoritmo trata de maneira relativamente equânime os três SLAs nas regiões de valores extremos de carga, baixa, até 55%, e elevada, próxima de 100%. Na região intermediária, entre 60 e 85%, prevalece a distribuição de banda em função das prioridades.

Tabela 4. Parâmetros de simulação do algoritmo proposto no padrão GPON.

| Descrição | GPON |
|--|--------|
| Taxa de bit total (Mbps) | 1000 |
| Taxa de bit ONU (Mbps) | 100 |
| Número Total de ONUs | 16 |
| Tamanho do buffer nas ONUs (MB) | 10 |
| Distância máxima entre OLT e ONUs (km) | 20 |
| Tamanho máximo do time slot (B) | 1215 |
| Tempo (bit) de guarda entre transmissões | 96 bit |
| Tempo máximo do ciclo de interrogação (μ s) | 125 |

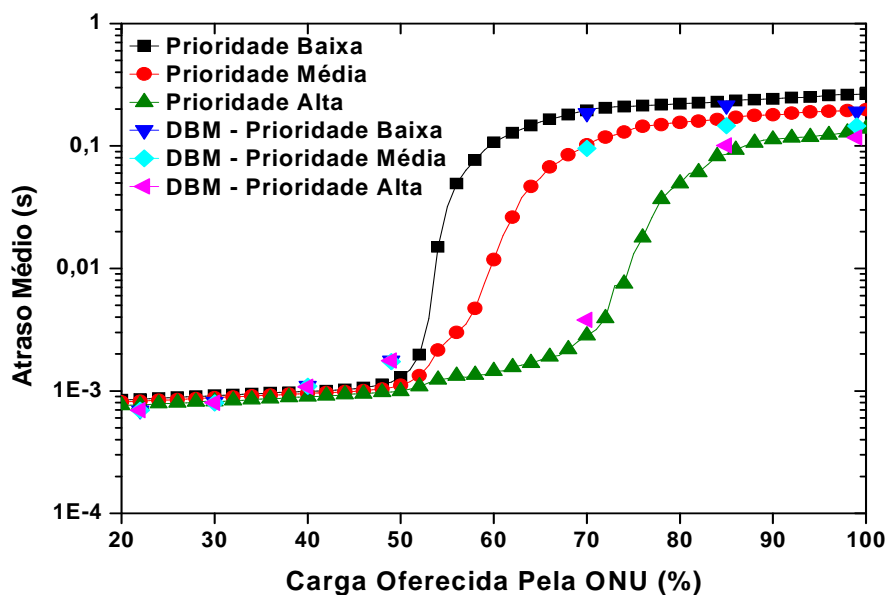


Figura 18. Algoritmo de alocação dinâmica de banda DMB [13]. Variação do atraso médio de pacote em função da carga oferecida por ONU para 1 contêiner de tráfego. A distribuição das ponderações para cada SLA é especificada na Tabela 3.

Para cargas baixas de tráfego, os algoritmos de alocação de banda apresentam comportamento semelhante: atrasos pequenos para todos os contêineres e SLAs por causa da disponibilidade de banda. No caso do algoritmo DMB, as curvas praticamente se superpõem.

De acordo com a Tabela 3, as ONUs aderentes ao SLA₁ (1 ONU) dispõem de 80,8 Mbps de banda mínima; o SLA₂ (5 ONUs), de 345,4 Mbps; o SLA₃ (10 ONUs), 573,8 Mbps. Assim, as curvas para baixas cargas espelham mais o comportamento (curvas coincidentes) de tráfego gerado e atendido e menos o de disputa de banda excedente (aumento do atraso). A ONU associada ao SLA₁ gera tráfego menor e dispõe de banda fixa mais banda extra para atendimento. A banda não utilizada por esta ONU fica disponível para realocação ao atendimento da demanda das ONUs dos SLAs 2 e 3, que geram mais tráfego, podem utilizar toda banda fixa e contam com a banda excedente dos SLAs de prioridade mais alta.

Nas seções seguintes iremos apresentar os algoritmos propostos neste trabalho para gerenciar a alocação dinâmica de banda.

RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste capítulo são propostos algoritmos de alocação dinâmica de banda para uma rede de acesso GPON. Esses foram baseados em topologia PON padrão GPON formada por uma OLT e 16 ONUs. O primeiro algoritmo apresentado aloca banda garantida (CIR) igual para todas as ONUs e em seguida realoca dinamicamente a banda não utilizada (EIR) com base nas prioridades dos SLAs. Este algoritmo não limita a utilização da EIR para os SLAs. Então, propomos um segundo algoritmo que limita a utilização de banda extra para os SLAs. Assim, tentamos alocar de forma mais equilibrada a banda não utilizada. Posteriormente, apresentamos um algoritmo que aloca a banda total da rede (PIR) para todas as ONUs e, caso estas não a utilizem, toda banda é realocada como banda não utilizada. Por fim, implementamos em nossas simulações um intervalo de processamento do DBA para tornar as simulações condizentes com o hardware da OLT. Isto é feito porque os equipamentos que implementam o DBA necessitam de um intervalo para o processamento das requisições de banda.

5.1 ALGORITMO SEM PONDERAÇÃO

Inicialmente, vamos apresentar os resultados de simulações computacionais do primeiro algoritmo proposto, que aloca banda garantida (CIR) igual para todas as ONUs e em seguida realoca dinamicamente a banda não utilizada (EIR) com base nas prioridades dos SLAs. A sequência de transmissão é sempre estabelecida de acordo com o padrão GPON. Os resultados foram baseados em topologia GPON formada por uma OLT e 16 ONUs. A distância entre OLT e ONUs é escolhida por sorteio, com base em variável aleatória, não excedendo 20 km, conforme estabelece a norma. Assim, o tempo de ida-e-volta (RTT) do sinal é diferente para cada ONU.

As 16 ONUs estão distribuídas em três tipos de SLAs, conforme mostra a Tabela 5. O gerenciamento de banda é realizado pelo DBA (*dynamic bandwidth assignment*), que aloca banda garantida (CIR) para todas as ONU. Em nossa abordagem, a banda excedente é

utilizada sem limitação pelos SLAs. O SLA₁ (prioridade alta) pode utilizar toda banda excedente em caso de necessidade. Depois de atendidas as solicitações do SLA₁, a banda que resta pode ser utilizada pelo SLA₂ (prioridade média), também sem restrição. O SLA₃ (prioridade baixa) utiliza a última porção de banda que restar. A seguir será apresentada a formulação matemática do primeiro algoritmo proposto.

Tabela 5. Prioridades dos SLAs e distribuição das ONUs.

| SLA | Prioridade | ONUs |
|-----|------------|--------|
| 1 | Alta | 1 a 4 |
| 2 | Média | 5 a 8 |
| 3 | Baixa | 9 a 16 |

5.1.1 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Em nossa implementação, a banda que será alocada ($B_{alocada}^t$) para cada ONU é composta pela banda garantida ($B_{garantida}$) e banda extra (B_{extra}^t), conforme

$$B_{alocada}^t = B_{garantida} + B_{extra}^t, \quad (5)$$

na qual t representa o número da prioridade (SLA), sendo, $t = 1$ prioridade alta, $t = 2$ prioridade média e $t = 3$ prioridade baixa.

A banda garantida representa a banda mínima (CIR) disponível que será alocada para todas as ONUs independentemente da prioridade. Nesta alocação, será atribuída uma banda básica ($B_{básica}$) para as ONUs verificando o tamanho da fila (Q). Se o tamanho da fila for menor ou igual à banda básica, a ONU receberá a quantidade de banda solicitada ao OLT, ou seja, Q . Isto é realizado para evitar desperdício de banda. Se o tamanho da fila for maior, será alocada a banda básica e a excedente será disputada seguindo os critérios de alocação da banda extra (B_{extra}^t). A banda garantida é alocada de acordo com

$$B_{garantida} = \begin{cases} B_{básica}; & Q > B_{básica} \\ Q; & Q \leq B_{básica} \end{cases} \quad (6)$$

A quantidade de banda extra que será alocada dinamicamente para as ONUs é composta pela diferença entre a banda total da rede (B_{total}) e a soma da banda garantida alocada para todas as ONUs, conforme

$$B_{n\tilde{a}o_utilizada} = B_{total} - \sum_{i=1}^k B_{garantida} \quad (7)$$

na qual k representa o número de ONUs.

A banda extra é alocada para as ONUs que necessitem de mais banda que a banda garantida. Se isto ocorrer e existir mais banda que a requerida, $B_{n\tilde{a}o_utilizada} \geq (Q - B_{garantida})$, a ONU receberá a quantidade de banda que solicitou (Q). Se existir menos, $(Q - B_{garantida}) > B_{n\tilde{a}o_utilizada}$, toda banda disponível será alocada. Caso a banda garantida seja suficiente para suprir a quantidade de banda solicitada pela ONU, não será necessário alocar banda extra. Toda alocação de banda extra é realizada de acordo com as prioridades de alocação (SLAs), conforme

$$B'_{extra} = \begin{cases} (Q - B_{garantida}); Q > B_{garantida} e B_{n\tilde{a}o_utilizada} \geq (Q - B_{garantida}) \\ B_{n\tilde{a}o_utilizada}; (Q - B_{garantida}) > B_{n\tilde{a}o_utilizada} \\ 0; B_{garantida} > Q \end{cases} \quad (8)$$

A Figura 19 ilustra o fluxograma do algoritmo implementado. Como descrito anteriormente, o algoritmo aloca a banda garantida para todas as ONUs. Se a soma da banda garantida for igual à banda total da rede não haverá EIR para ser alocada dinamicamente para as ONUs. No entanto, se houver EIR, ela será alocada para as ONUs de SLA₁. Posteriormente, se ainda houver banda, aloca-se para as ONUs de SLA₂. Por fim, aloca-se banda para as ONUs de SLA₃.

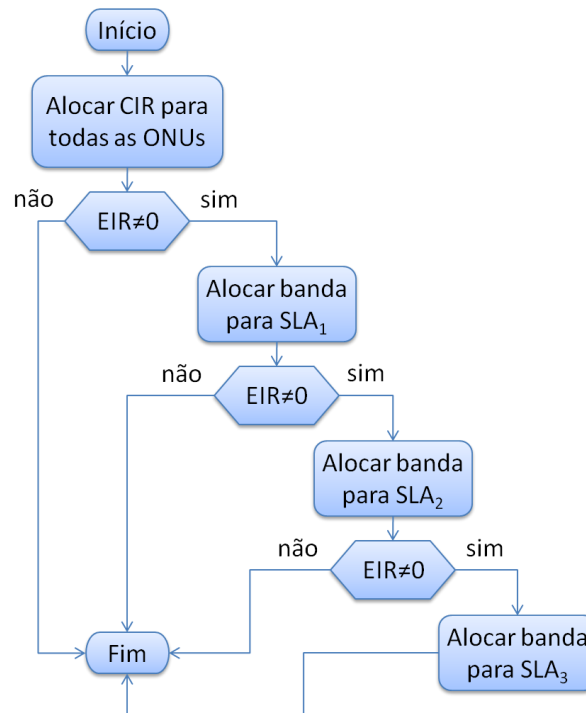


Figura 19. Fluxograma do algoritmo sem ponderação. CIR: *Committed information rate*; EIR: *Excess information rate*; SLA: *Service level agreement*.

5.1.2 SIMULAÇÃO – ALGORITMO PARA UM CONTÊINER

A Tabela 6 lista os parâmetros utilizados nas simulações do algoritmo proposto e a Tabela 5 suas prioridades. A Figura 20 mostra o atraso médio de pacote em função da carga oferecida para os três SLAs e apenas um contêiner de tráfego. Utilizamos apenas um contêiner para evidenciar o efeito da disputa de banda excedente pelas ONUs. Este gráfico é utilizado nas simulações como padrão de resultado do efeito de alocação de banda não utilizada de acordo com os SLAs. A diferença entre os valores de atraso médio de pacote dos SLAs 1 e 3 é acentuada porque a banda não utilizada, a que excede a banda garantida alocada (7) para todas as ONUs, é realocada em sequência para os SLAs 1, 2 e 3. Quando a rede está com carga máxima, os SLAs 1 e 2 praticamente consomem toda banda excedente. Assim, a adoção de critério de utilização livre, sem restrição da quantidade máxima, da banda excedente de acordo com os SLAs acarreta grande diferença entre os valores de atraso médio. Neste caso, a rede se comporta com parcialidade (*unfairness*), pois os SLAs de prioridade mais alta consomem as maiores porções de banda. Este efeito pode ser visto de outra forma nas Figuras 21 e 22, que relacionam a quantidade de banda solicitada e atendida por número de solicitações por ONU e por SLA.

Tabela 6. Parâmetros de simulação do algoritmo proposto no padrão GPON.

| Descrição | GPON |
|--|--------|
| Taxa de bit total (Gbps) | 1,25 |
| Taxa de bit ONU (Mbps) | 100 |
| Número Total de ONUs | 16 |
| Tamanho do buffer nas ONUs (MB) | 10 |
| Distância máxima entre OLT e ONUs (km) | 20 |
| Tamanho máximo do time slot (B) | 1215 |
| Tempo (bit) de guarda entre transmissões | 96 bit |
| Tempo máximo do ciclo de interrogação (μ s) | 125 |

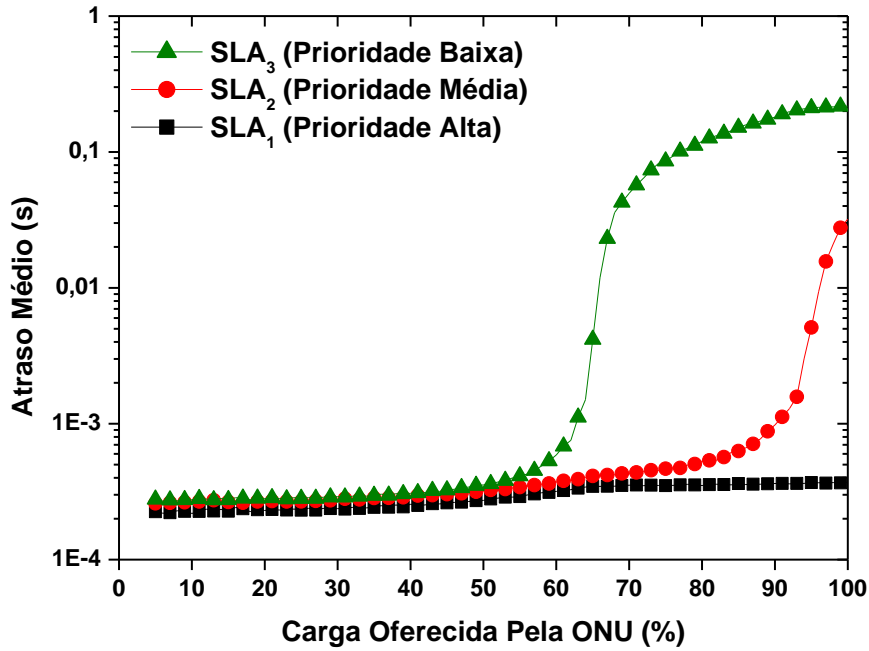


Figura 20. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para os 3 SLAs e um contêiner de tráfego. A sequência de prioridade de SLA é mostrada na Tabela 5 e os parâmetros da simulação na Tabela 6.

A Figura 21 mostra o volume de tráfego da rede em Terabyte relacionado com as bandas solicitadas e atendidas por ONU em função dos SLAs para 100% de carga oferecida por ONU. O tráfego é gerado de forma similar para todas as ONUs. Se a quantidade de banda solicitada por ONU for atendida pela OLT, o volume de tráfego contido nos contêineres diminui, pois o tráfego é enviado ao OLT. No entanto, à medida que o volume de tráfego aumenta nos contêineres, a banda solicitada torna-se maior que a banda atendida e as ONUs precisarão solicitar uma quantidade maior de banda. Os valores mostrados se referem à média de 5 simulações realizadas. A banda média por ONU associada ao SLA é calculada por

$$B_{s,a,média} = \frac{B_{s,a,total}}{N_{SLA}} \quad (9)$$

na qual $B_{s,a,média}$ é a banda média (por SLA), em bps; $B_{s,a,total}$ é a banda total (por SLA), em bps; N_{SLA} é o número de ONUs associados aos SLAs, especificados na Tabela 5; ‘s’ e ‘a’ significam solicitada e atendida, respectivamente.

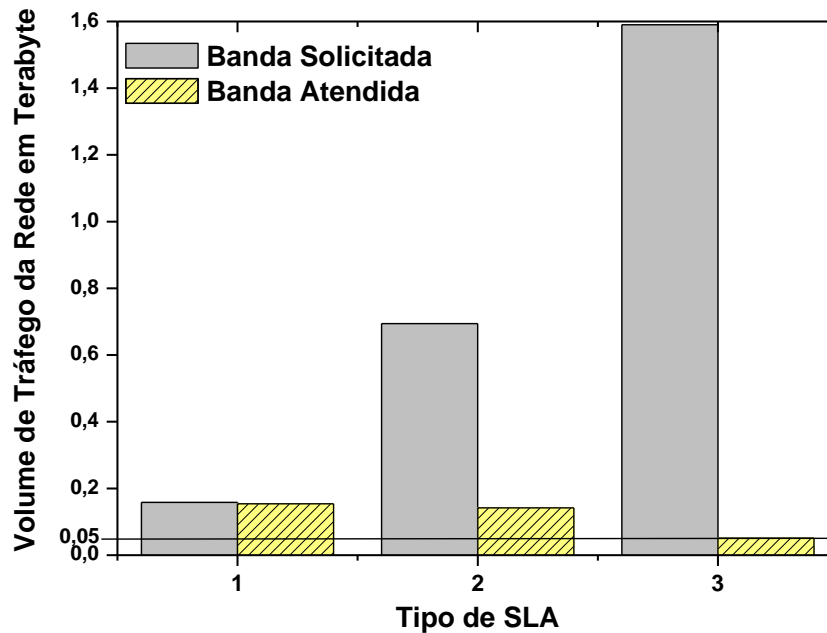


Figura 21. Volume de tráfego da rede em Terabyte relacionado com as bandas solicitadas e atendidas por ONU em função dos SLAs para 100% de carga oferecida por ONU. A linha horizontal delimita a quantidade de banda garantida e a quantidade de banda extra alocado para cada SLA. Abaixo desta linha temos a quantidade de banda garantida e acima a quantidade de banda extra.

Na Figura 21, para 100% de carga oferecida por ONU as solicitações do SLA₃ são atendidas para o volume de tráfego de até 0,05 Terabyte. Isto representa que o SLA₃ receberá apenas a banda garantida de 40 Mbps (observar na Figura 22 as bandas solicitadas e atendidas para o SLA₃). Isto ocorre porque a banda não utilizada (banda extra) é realocada sequencialmente para os SLAs 1, 2 e 3, sendo o SLA₃ o mais prejudicado não dispondo de banda extra para atendimento de suas solicitações.

Os valores de bandas mostradas na Figura 21, embora calculados por ONU associada à prioridade, são ainda valores essencialmente absolutos quando comparados com o total de solicitações de todas as ONUs da rede. Há várias opções para calcular a média por solicitação e uma delas considera as bandas solicitadas e atendidas pelas 16 ONUs da rede. Neste caso, as solicitações das ONUs associadas aos SLAs ficam mascaradas. Uma forma de evitar este mascaramento é calcular o número médio de solicitações feitas pelas 16 ONUs da rede. Este número é $S_{médio} = S_{total} / N_{ONU,total}$, na qual $S_{médio}$ é o número médio de solicitações; S_{total} é o

número total de solicitações das 16 ONUs; $N_{ONU, total}$ é o número total de ONUs, no caso, 16. Este valor médio de solicitações é 10.341 e foi determinado em 5 simulações. Assim, a Figura 22 mostra a banda média por SLA em relação à quantidade média de solicitações da rede, $B_{s,a,média} / S_{médio}$ em bps. Somando as bandas atendidas e multiplicando pela quantidade de ONUs associadas às prioridades, vamos obter a banda total da rede (1,25 Gbps). Como podemos observar na Figura 22, o SLA₃ não recebe banda extra, apenas a banda garantida, 40 Mbps. Desta forma, percebemos que o volume de tráfego da rede atendido pela banda garantida alocada é 0,05 Terabyte (Figura 21). A Tabela 7 apresenta os valores de banda atendida mostrada na Figura 22 e o total de banda atendida em 100% de carga.

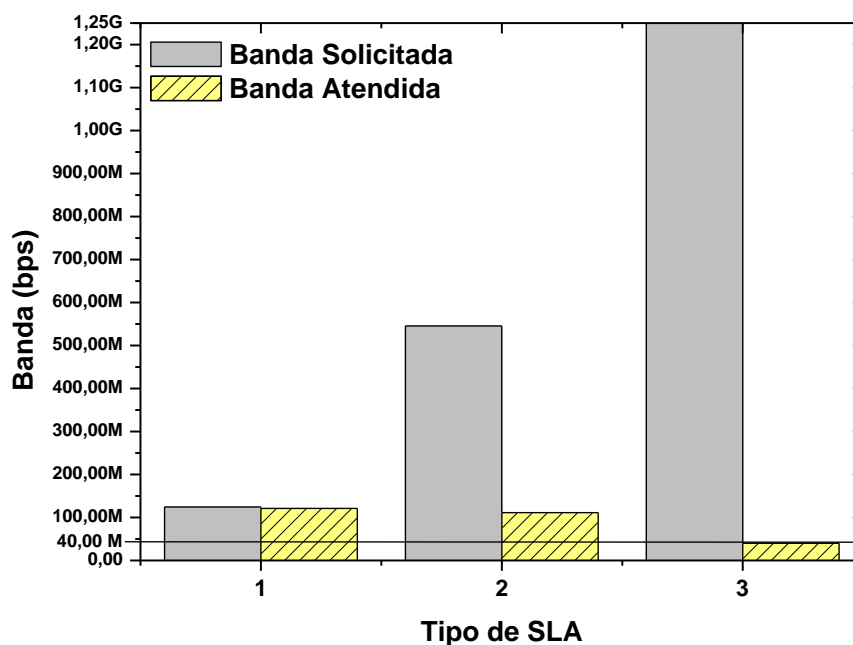


Figura 22. Bandas solicitadas e atendidas por SLA pela quantidade média de solicitações da rede. Calculada para 100% de carga oferecida por ONU, um contêiner de tráfego e média de cinco simulações. A linha horizontal delimita a quantidade de banda garantida e a quantidade de banda extra. Abaixo desta linha temos a banda garantida e acima a banda extra.

Tabela 7. Prioridades dos SLAs, atraso médio para 100% de carga por ONU (ms), número de ONUs por SLA, banda garantida e extra em 100 % de carga (Mbps).

| SLA | Atraso Médio para 100% de carga por ONU (ms) | Número de ONUs por SLA | Banda Garantida (Mbps) | Banda Extra (Mbps) | Banda em 100 % de carga (Mbps) | Banda Total em 100 % de carga (Mbps) |
|--------------|--|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 0,3703 | 4 | 40 | 81,1 | 121,1 | 484,4 |
| 2 | 32,02 | 4 | 40 | 71,4 | 111,4 | 445,6 |
| 3 | 217,57 | 8 | 40 | 0 | 40 | 320 |
| Total | | | | | | 1250 Mbps |

A Figura 23 ilustra as bandas solicitadas e atendidas pelas ONUs de SLA₃ para alguns valores de carga oferecida pela ONU. O resultado mostrado na Figura 22 (100% de carga) está incluído. O SLA₃ representa a situação mais crítica porque é o de prioridade mais baixa. Para cargas baixas e médias de carga (até 60%) o atendimento às solicitações é adequado (atraso pequeno; ver Figura 20).

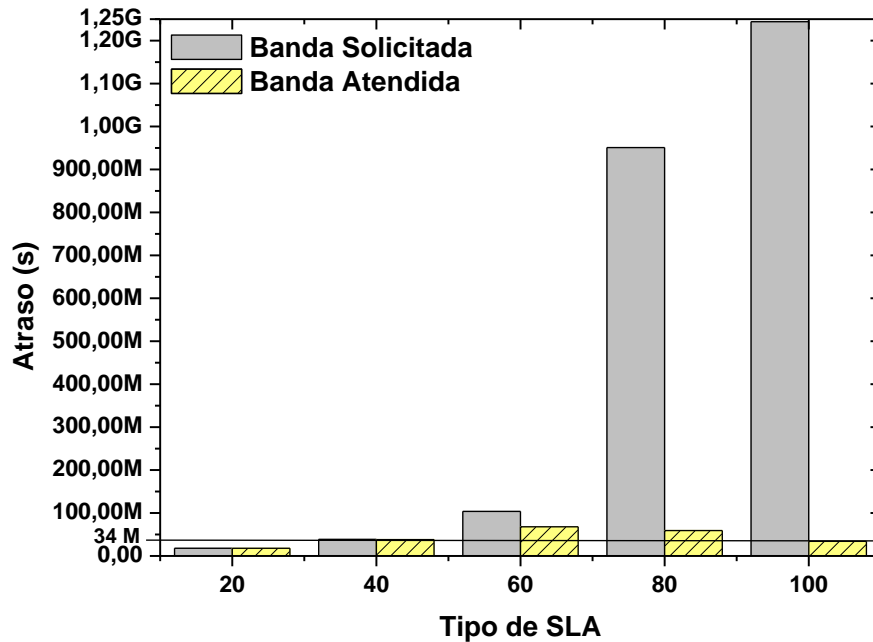


Figura 23. Bandas solicitadas e atendidas pelo SLA₃ pela quantidade média de solicitações da rede. Calculada para várias condições de carga oferecida por ONU, um contêiner de tráfego e média de cinco simulações. A linha horizontal delimita a quantidade de banda garantida e a quantidade de banda extra. Abaixo desta linha temos a banda garantida e acima a banda extra.

Na próxima seção iremos analisar do atraso médio de pacotes para os três tipos de SLAs utilizando quatro contêineres. O quinto contêiner não é utilizado porque ele pode receber os tráfegos dos contêineres de 1 a 4. Então, em princípio, não é interessante analisar este contêiner para saber qual o comportamento do tráfego já que estará sendo analisado pelos quatro contêineres.

5.1.3 SIMULAÇÃO – ALGORITMO PARA QUATRO CONTÊINERES

As simulações seguintes referem-se a uma rede GPON com 4 contêineres (o T-CONT 5 não é utilizado) e três tipos de SLAs, conforme mostra a Tabela 5. Os parâmetros utilizados nas simulações a seguir estão listados na Tabela 6.

A Figura 24 ilustra o atraso médio de pacotes para os 4 T-CONTs e SLA₁ (ONUs 1 a 4). Para uma determinada carga, os atrasos médios aumentam à medida que a prioridade do T-

CONT diminui. Notar que a partir de 78 %, o atraso para o T-CONT 1 permanece constante e os demais T-CONTs têm aumento significativo. É porque toda banda é alocada para o T-CONT 1 quando a carga da rede satura ($16 \text{ ONUs} \times 78 \text{ Mbps} = 1,25 \text{ Gbps}$).

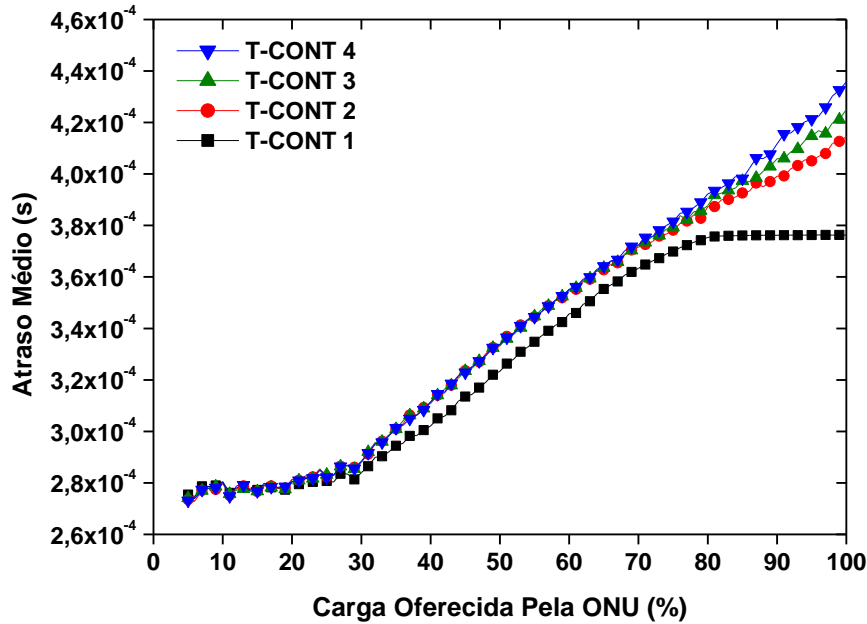


Figura 24. Atraso médio dos T-CONTs de prioridade alta (SLA₁).

A Figura 25 mostra o atraso médio de pacotes para a prioridade média (SLA₂). Para valores elevados de carga, os atrasos se diferenciam porque a alocação de banda atende os T-CONTs de maior prioridade. Os valores de atraso médio são maiores quando comparados com os mostrados na Figura 24 porque a banda é alocada prioritariamente para o SLA₁ e depois para os demais SLAs.

A Figura 26 mostra o atraso médio dos quadros em função da carga por ONU para a prioridade baixa (SLA₃). O DBA aloca maior banda para os SLAs de maior prioridade. Portanto, o SLA₃ tem o maior atraso dentre eles. Quando a carga da ONU alcança 75%, a capacidade da rede está perto de ser atingida, acentuando o atraso. A Tabela 8 resume os valores de atraso médio de pacotes para 100% de carga por ONU.

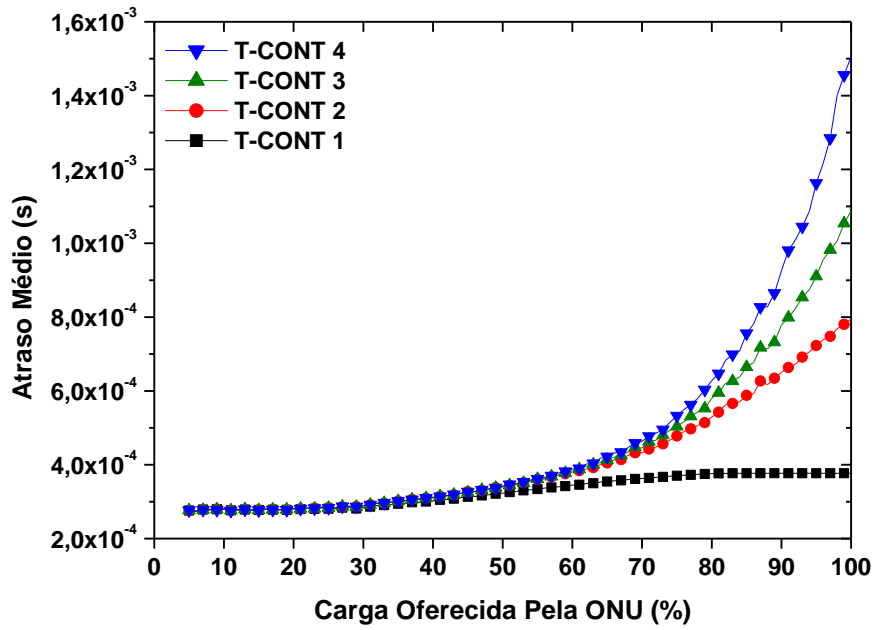


Figura 25. Atraso médio dos T-CONTs de prioridade média (SLA₂).

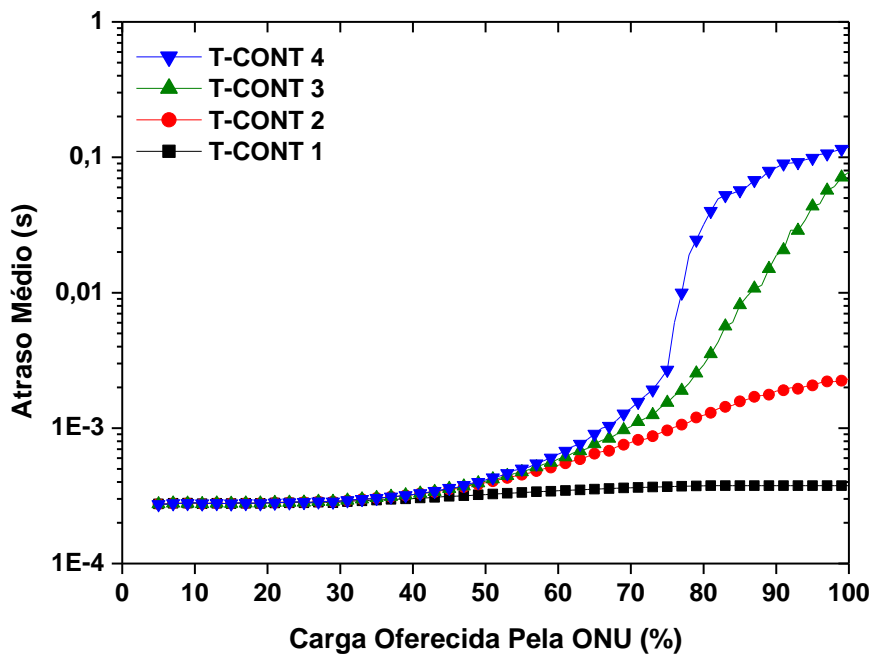


Figura 26. Atraso médio dos T-CONTs de prioridade baixa (SLA₃).

Tabela 8. Atraso médio dos T-CONTs dos SLAs para 100% de carga por ONU.

| T-CONT | Atraso Médio (ms) | | |
|--------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | SLA ₁ (Alta) | SLA ₂ (Média) | SLA ₃ (Baixa) |
| 1 | 0,3762 | 0,3768 | 0,3764 |
| 2 | 0,4145 | 0,7948 | 2,31 |
| 3 | 0,4250 | 1,09 | 77,64 |
| 4 | 0,4358 | 1,51 | 118,59 |

A Figura 27 resume o atraso médio dos três tipos de SLAs para o T-CONT 3, mostrados nas Figuras 24 a 26. As ONUs que pertencem ao SLA de maior prioridade dispõem de mais banda e, conseqüentemente, o tráfego experimenta menor atraso. Para cargas menores que 50%, o atraso dos pacotes referentes aos SLAs estão bem próximos. Isto ocorre porque a quantidade de banda disponível, para ser alocada, atender a demanda de tráfego das ONUs. Entre 50% e 70%, o atraso do SLA₃ começa a aumentar em relação aos outros porque a banda passa a ser alocada prioritariamente para o SLA₁ e SLA₂. Para cargas maiores que 70%, o atraso do SLA₂ aumenta, o atraso do SLA₃ acentua-se e o do SLA₁ permanece aproximadamente constante. Neste caso, o algoritmo realoca quase toda banda não utilizada para o SLA₁, devido este ter maior prioridade sobre os demais, e se ainda houver banda, será realocado para os demais SLAs.

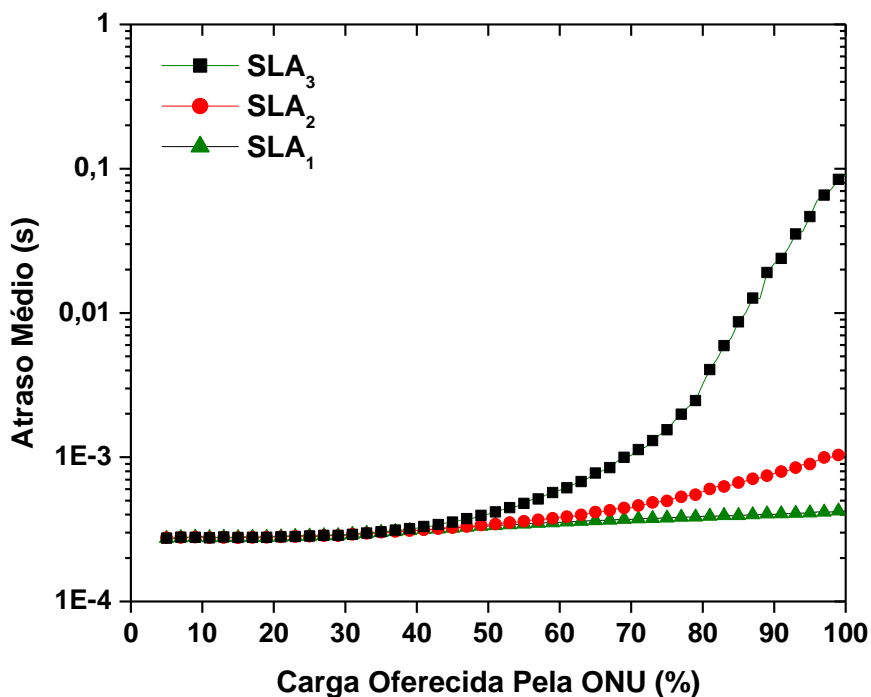


Figura 27. Atraso médio dos três tipos de SLA para o T-CONT 3.

Na próxima seção verifica-se o comportamento dos atrasos médios de pacotes para os três tipos de SLAs quando a banda garantida é alterada. Esta simulação é realizada para saber quais SLAs são beneficiados e quais são prejudicados com aumento da banda garantida.

5.1.4 DESEMPENHO DO ALGORITMO SEM PONDERAÇÃO EM FUNÇÃO DA BANDA GARANTIDA

Nesta etapa, vamos simular uma rede GPON com três valores de banda garantida: 20, 40 e 60 Mbps, conforme mostra a Tabela 9. A Figura 28 mostra a variação do atraso médio de pacote em função da carga oferecida por ONU.

Tabela 9. Banda garantida e banda extra para alocação. Rede com 16 ONUs e 1,25 Gbps.

| Banda Garantida (Mbps) | Banda Garantida Alocada Para as 16 ONUs | Banda Extra Total (Mbps) | Banda Total (Mbps) |
|------------------------|---|--------------------------|--------------------|
| 20 | 320 | 930 | 1250 |
| 40 | 640 | 610 | |
| 60 | 960 | 290 | |

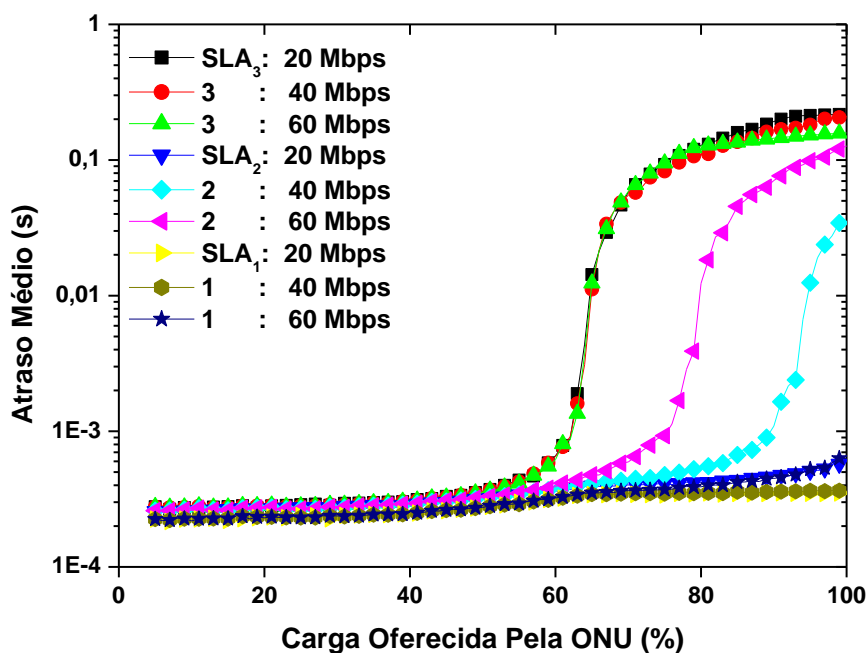


Figura 28. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para os 3 SLAs, um contêiner de tráfego e três valores de banda garantida. A sequência de prioridade de SLA é mostrada na Tabela 5 e os parâmetros da simulação na Tabela 6. A Tabela 9 lista a banda garantida e a banda extra alocada nesta simulação.

Quanto maior for a banda garantida, menor será a banda extra a ser disputada. Em situação de tráfego intenso, a banda garantida não é suficiente para atender as solicitações e os SLAs de maior prioridade são beneficiados com a banda extra.

As ONUs pertencentes ao SLA₂ são as que têm o desempenho acentuadamente modificado pela escolha da banda garantida. Como neste algoritmo a banda extra é livremente utilizada pelas ONUs, o comportamento das curvas espelha a disputa por banda extra. Quanto mais banda extra, mais banda é destinada aos SLAs de prioridade alta. Desta forma, o

desempenho das ONUs do SLA₁ é praticamente o mesmo para bandas garantidas de 20 e 40 Gbps. Para 60 Mbps, o atraso aumenta.

O atraso médio de pacote das ONUs pertencentes ao SLA₃ apresenta redução marginal para cargas próximas de 100% para banda garantida de 60 Mbps. Há 8 ONUs aderentes a este SLA, número responsável pela geração de muito tráfego, que consome toda banda garantida e não dispõe de quase nenhuma banda extra porque está em última prioridade. Este SLA é levemente beneficiado somente quando há banda garantida maior, não tendo que disputar banda com as ONUs dos outros SLAs.

Em cenário de disputa livre de banda, as ONUs do SLA₂ são beneficiadas para valores menores de banda garantida. Como há 4 ONUs aderentes a este SLA, elas geram intensidade de tráfego equivalente às ONUs do SLA₁ (4 ONUs também), mas perdem na disputa de banda extra por causa da prioridade.

Na próxima seção alteramos o algoritmo sem ponderação, com intuito de distribuir a banda extra de forma mais equilibrada. Com esta alteração a banda extra será distribuída para os SLAs em porcentagens. O algoritmo que vamos apresentar é chamado de algoritmo com ponderação.

5.2 ALGORITMO COM PONDERAÇÃO

O algoritmo apresentado anteriormente não limita a utilização da banda extra para os SLAs 1, 2 e 3, ocasionando mais banda para os SLAs de maior prioridade. Para que o algoritmo distribua a banda extra de forma equilibrada propomos um ajuste em (7). Desta forma, a quantidade de banda extra que será alocada para os SLAs serão divididos em porcentagens, conforme

$$B_{n\grave{a}o_utilizada}^t = \left(B_{total} - \sum_{i=1}^k B_{garantida} \right) W_t, \quad (10)$$

na qual t representa o número da prioridade (SLA) e W_t o fator de distribuição. Este fator especifica a quantidade de banda que cada prioridade pode obter. $W_t = 1,0$ indica a banda extra total que será alocada (100% da banda extra). Nas simulações seguintes são apresentadas duas configurações de quantidade banda extra para ser alocada em relação às prioridades.

5.2.1 SIMULAÇÃO 1

As Tabelas 6 e 10 listam os parâmetros utilizados na simulação. A banda garantida para todas as ONUs é 20 Mbps e as porcentagens de banda extra que será alocada para todas as prioridades são: 50% ($W_1=0,5$) para SLA₁; 30% ($W_2=0,3$) para SLA₂; e 20 ($W_3=0,2$) para SLA₃. Com esta configuração, percebemos que os atrasos referentes ao SLA₃ começam a aumentar a partir de 60 % da carga da rede (Figura 29). Isto ocorre porque os critérios de alocação da banda extra priorizarão os SLAs 1 e 2. Então, analisamos o SLA₃ quando o atraso fica acentuado, ou seja, a partir de 65% da carga da rede. Nesta situação, o SLA₃ solicita ao OLT toda banda da rede (1,25 Gbps), isto ocorre devido à acumulação de pacotes presente nas filas das ONUs que não foram enviados ao OLT por falta de banda. As bandas destinadas para os SLAs 1, 2 e 3 são 90,9 Mbps, 90,7 Mbps e 65,4 Mbps, respectivamente. As Figuras 29 e 30 ilustram o atraso médio da rede e a banda média por SLA em relação à quantidade média de solicitações da rede em 100 % de carga.

É importante salientar que a solicitação de banda do SLA₂ (Figura 30) é maior que a do algoritmo sem ponderação (algoritmo anterior, Figura 22). Isto se deve à quantidade de banda que foi retirada, devido às ponderações, dos SLAs 1 e 2, e adicionada ao SLA₃. Se observarmos na Tabela 11, na coluna de banda em 100 % de carga e na linha do SLA₃, ilustrada na Figura 30, perceberemos que há um aumento de 3,5 Mbps de banda para cada ONU em relação ao algoritmo anterior. Então, como são 8 ONUs, temos 3,5 Mbps x 8 ONUs = 28 Mbps, sendo que destes, 0,8 Mbps são do SLA₁ e 27,2 do SLA₂. Com isto, podemos notar também que o atraso médio do SLA₃ diminui em decorrência da maior quantidade de banda e os atrasos dos SLAs 1 e 2 aumentam.

Tabela 10. Prioridades dos SLAs, distribuição das ONUs, banda garantida e porcentagem de banda extra.

| SLA | Prioridade | ONUs | Banda Garantida (Mbps) | Porcentagem de Banda Extra (%) |
|-----|------------|--------|------------------------|--------------------------------|
| 1 | Alta | 1 a 4 | 20 | 50 |
| 2 | Média | 5 a 8 | 20 | 30 |
| 3 | Baixa | 9 a 16 | 20 | 20 |

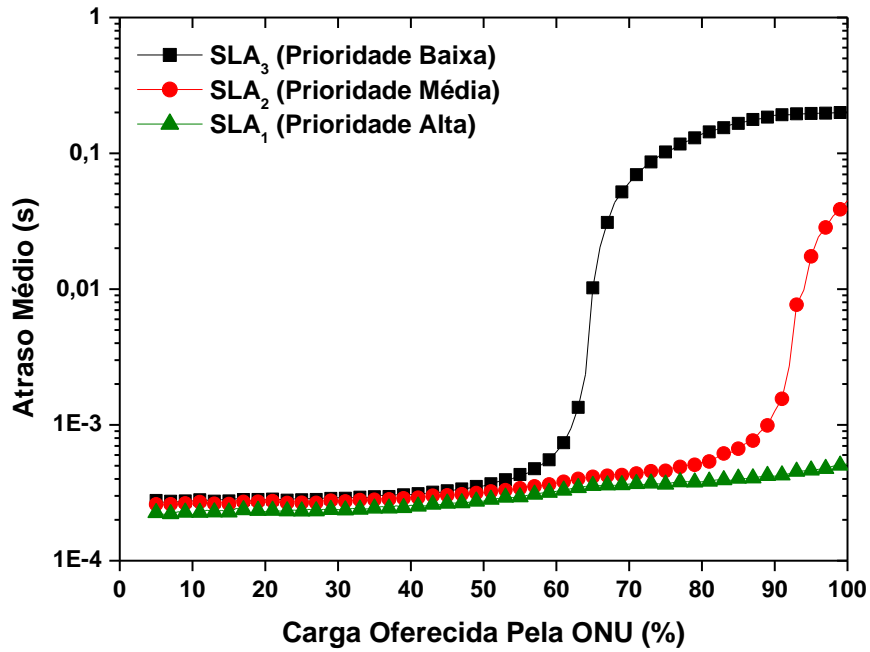


Figura 29. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para os 3 SLAs e um contêiner de tráfego. A sequência de prioridade de SLA é mostrada na Tabela 10 e os parâmetros da simulação na Tabela 6.

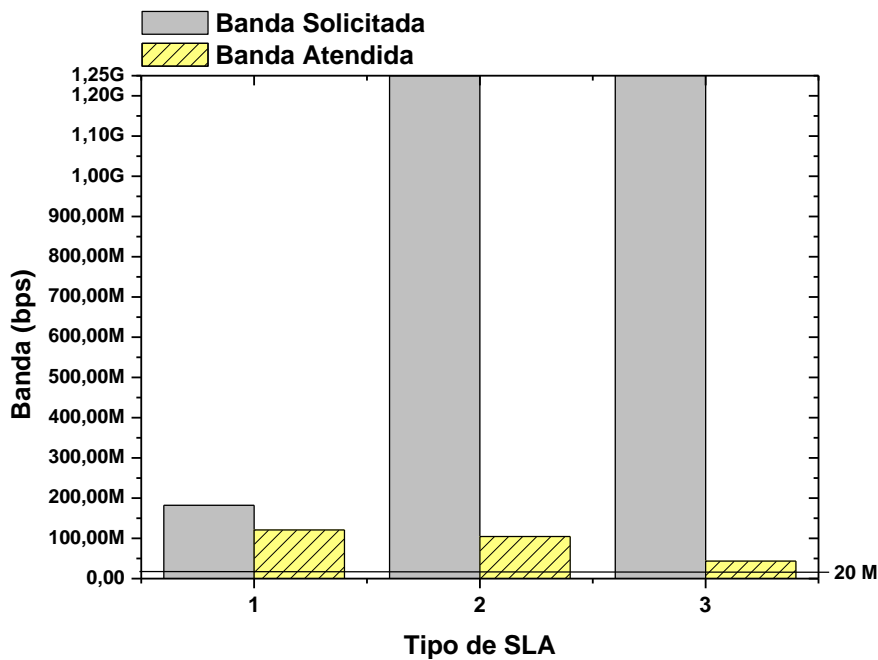


Figura 30. Bandas solicitadas e atendidas por SLA pela quantidade média de solicitações da rede. Calculada para 100% de carga oferecida por ONU, um contêiner de tráfego e média de cinco simulações. A linha horizontal delimita a quantidade de banda garantida e a quantidade de banda extra. Abaixo desta linha temos a banda garantida e acima a banda extra.

Tabela 11. Prioridades dos SLAs, atraso médio para 100% de carga por ONU (ms), número de ONUs por SLA, banda garantida e extra em 100 % de carga (Mbps).

| SLA | Atraso Médio para 100% de carga por ONU (ms) | Número de ONUs por SLA | Banda Garantida (Mbps) | Banda Extra (Mbps) | Banda em 100 % de carga (Mbps) | Banda Total em 100 % de carga (Mbps) |
|-----|--|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 0,5167 | 4 | 20 | 100,9 | 120,9 | 483,6 |
| 2 | 44,92 | 4 | 20 | 84,6 | 104,6 | 418,4 |
| 3 | 200,41 | 8 | 20 | 23,5 | 43,5 | 348 |
| | | | | | Total | 1250 Mbps |

5.2.2 SIMULAÇÃO 2

Nesta simulação alteramos a banda garantida de 20 Mbps para 40 Mbps e a distribuição das porcentagens de banda extra, que será alocada para cada prioridade, continua a mesma: 50% ($W_1=0,5$) para SLA_1 ; 30% ($W_2=0,3$) para SLA_2 ; e 20 ($W_3=0,2$) para SLA_3 . O resultado desta simulação segue a mesma tendência do resultado anterior. No entanto, como a banda garantida aumentou, o SLA_3 recebe mais banda, diminuindo a quantidade de banda extra da rede. Desta forma, os $SLAs$ 1 e 2, que se beneficiam com a banda extra, tem um aumento significativo no atraso. As Tabelas 6 e 12 listam os parâmetros utilizados nesta simulação e a Figura 31 mostra o resultado do atraso médio dos pacotes para os três tipos de $SLAs$. Se compararmos o resultado da Figura 31 com a Figura 29, da simulação anterior, iremos notar uma melhora de 40,03 ms em relação ao atraso do SLA_3 . Esta comparação pode ser vista analisando as colunas de atraso médio para 100% de carga por ONU para o SLA_3 nas Tabelas 11 e 13. Observando a Figura 32 e a Tabela 13 percebemos que há um aumento de banda para o SLA_3 de 13,4 Mbps em relação ao algoritmo anterior que utilizou 20 Mbps de banda garantida. Desta forma, o SLA_3 recebe 13,4 Mbps x 8 ONUs = 107,2 Mbps, sendo que destes, 29,2 são do SLA_1 e 78 Mbps do SLA_2 . Este resultado pode ser observado comparando as colunas de banda em 100 % de carga para o SLA_3 nas Tabelas 11 e 13.

Tabela 12. Prioridades dos SLAs, distribuição das ONUs, banda garantida e porcentagem de banda extra.

| SLA | Prioridade | ONUs | Banda Garantida (Mbps) | Porcentagem de Banda Extra (%) |
|-----|------------|--------|------------------------|--------------------------------|
| 1 | Alta | 1 a 4 | 40 | 50 |
| 2 | Média | 5 a 8 | 40 | 30 |
| 3 | Baixa | 9 a 16 | 40 | 20 |

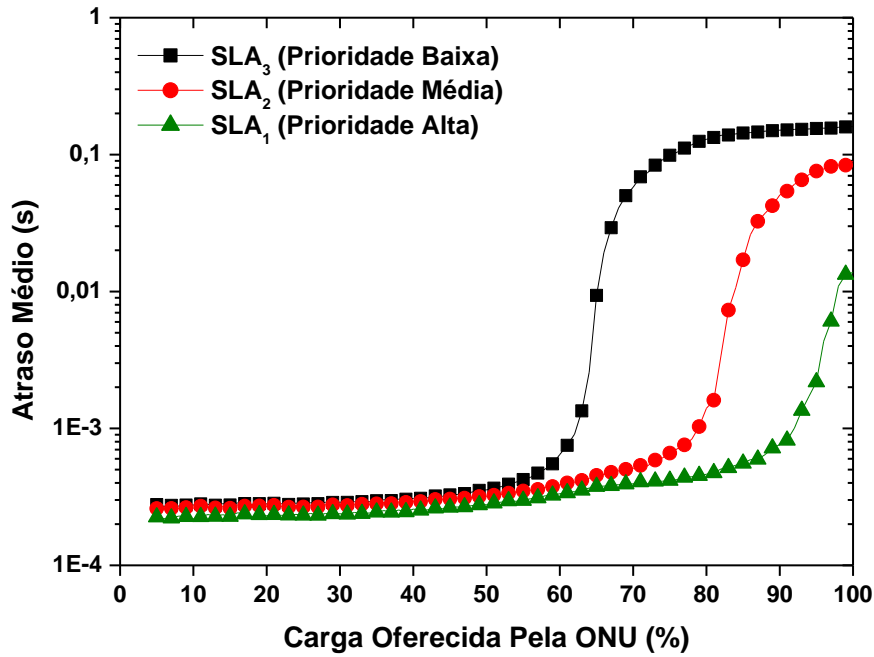


Figura 31. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para os 3 SLAs e um contêiner de tráfego. A sequência de prioridade de SLA é mostrada na Tabela 12 e os parâmetros da simulação na Tabela 6.

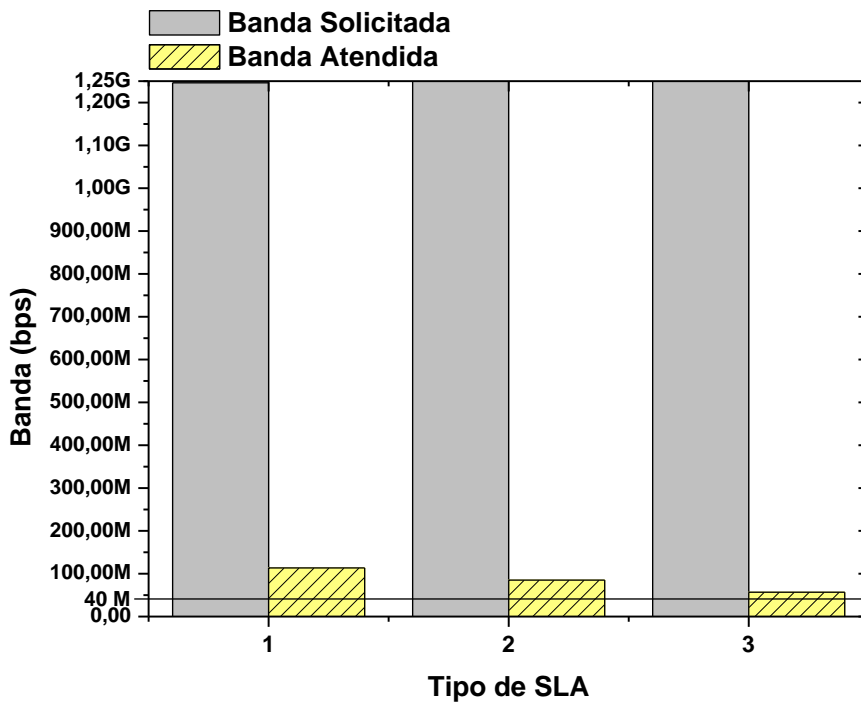


Figura 32. Bandas solicitadas e atendidas por SLA pela quantidade média de solicitações da rede. Calculada para 100% de carga oferecida por ONU, um contêiner de tráfego e média de cinco simulações. A linha horizontal delimita a quantidade de banda garantida e a quantidade de banda extra. Abaixo desta linha temos a banda garantida e acima a banda extra.

Tabela 13. Prioridades dos SLAs, atraso médio para 100% de carga por ONU (ms), número de ONUs por SLA, banda garantida e extra em 100 % de carga (Mbps).

| SLA | Atraso Médio para 100% de carga por ONU (ms) | Número de ONUs por SLA | Banda Garantida (Mbps) | Banda Extra (Mbps) | Banda em 100 % de carga (Mbps) | Banda Total em 100 % de carga (Mbps) |
|-----|--|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 13,76 | 4 | 40 | 73,6 | 113,6 | 454,4 |
| 2 | 89,23 | 4 | 40 | 45,1 | 85,1 | 340,4 |
| 3 | 160,38 | 8 | 40 | 16,9 | 56,9 | 455,2 |
| | | | | | Total | 1250 Mbps |

5.2.3 SIMULAÇÃO 3

Sabemos que o SLA₃ tem menos prioridade na alocação da banda extra, então alteramos as porcentagens para: 40% ($W_1=0,4$) para SLA₁; 30% ($W_2=0,3$) para SLA₂; e 30% ($W_3=0,3$). Desta forma, vamos analisar o comportamento dos SLAs quando temos menos banda para o SLA₁ e mais banda extra para o SLA₃. As Tabelas 6 e 14 listam os dados utilizados na simulação.

Como podemos observar nas Figuras 33 e 34 e na Tabela 15, coluna de atraso médio para 100% de carga por ONU, o SLA₁ sofre aumento de 39,23 ms no atraso médio de envio de pacotes, quando comparado com a Tabela 13. Outro resultado interessante é a redução de 57,2 Mbps de banda (coluna banda total em 100 % de carga). A maior parte desta banda (56,8 Mbps) é alocada para o SLA₃, e apenas uma pequena parte (0,8 Mbps) é alocada para o SLA₂ que adquire banda através da banda extra. Outra análise importante é a comparação dos atrasos referentes ao SLA₂ para 100 % de carga nas Tabelas 13 e 15, pois percebemos que a diferença é pequena (1,1 ms). No entanto, quando analisamos para 80% de carga observamos que esta diferença torna-se acentuada (32,08 ms). Isto se deve à quantidade de banda alocada para este SLA em 80% de carga, sendo que nas Figuras 31 e 33 são, respectivamente, 96,5 Mbps e 87 Mbps.

Tabela 14. Prioridades dos SLAs, distribuição das ONUs, banda garantida e porcentagem de banda extra.

| SLA | Prioridade | ONUs | Banda Garantida (Mbps) | Porcentagem de Banda Extra (%) |
|-----|------------|--------|------------------------|--------------------------------|
| 1 | Alta | 1 a 4 | 40 | 40 |
| 2 | Média | 5 a 8 | 40 | 30 |
| 3 | Baixa | 9 a 16 | 40 | 30 |

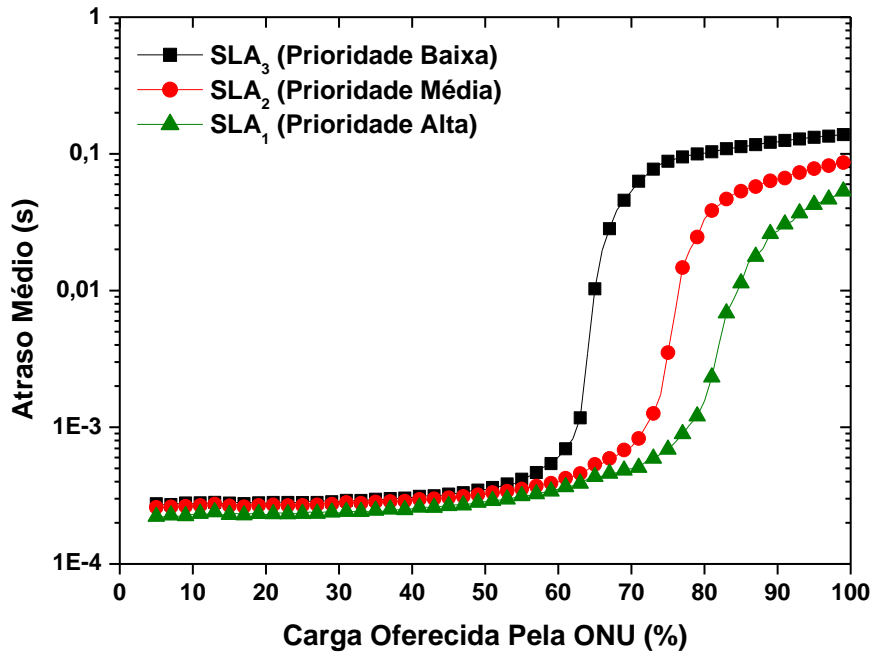


Figura 33. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para os 3 SLAs e um contêiner de tráfego. A sequência de prioridade de SLA é mostrada na Tabela 14 e os parâmetros da simulação na Tabela 6.

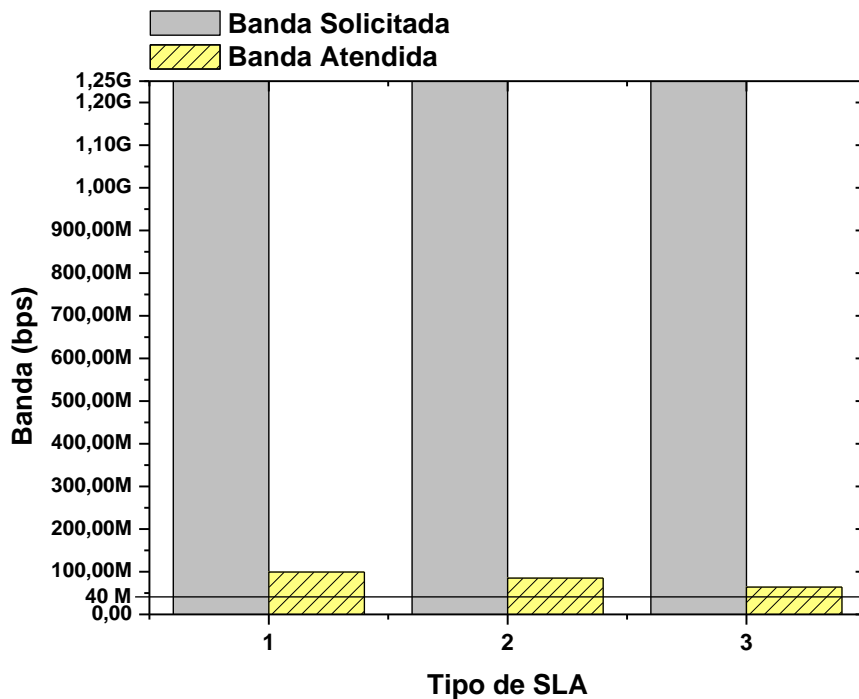


Figura 34. Bandas solicitadas e atendidas por SLA pela quantidade média de solicitações da rede. Calculada para 100% de carga oferecida por ONU, um contêiner de tráfego e média de cinco simulações. A linha horizontal delimita a quantidade de banda garantida e a quantidade de banda extra. Abaixo desta linha temos a banda garantida e acima a banda extra.

Tabela 15. Prioridades dos SLAs, atraso médio para 100% de carga por ONU (ms), número de ONUs por SLA, banda garantida e extra em 100 % de carga (Mbps).

| SLA | Atraso Médio para 100% de carga por ONU (ms) | Número de ONUs por SLA | Banda Garantida (Mbps) | Banda Extra (Mbps) | Banda em 100 % de carga (Mbps) | Banda Total em 100 % de carga (Mbps) |
|-----|--|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 52,99 | 4 | 40 | 59,3 | 99,3 | 397,2 |
| 2 | 88,13 | 4 | 40 | 45,2 | 85,2 | 340,8 |
| 3 | 139,69 | 8 | 40 | 24 | 64 | 512 |
| | | | | | Total | 1250 Mbps |

Nas simulações apresentadas até o momento, dois algoritmos foram propostos e ambos alocam a banda garantida (CIR) para todas as ONUs e, posteriormente, alocam a banda restante dinamicamente (banda extra). Nas próximas seções, iremos apresentar um algoritmo que aloca toda banda da rede (PIR), primeiramente, e se caso sobrar banda, será alocada posteriormente. A diferença dos algoritmos apresentados até o momento e o próximo algoritmo é que nesses apenas uma parte da banda é designada para todas as ONUs (banda garantida), restando banda para ser alocada dinamicamente. No próximo algoritmo, que iremos apresentar, toda banda da rede é distribuída para as ONUs e caso alguma ONU não utilize toda banda, será realocada dinamicamente para outra ONU a banda não utilizada.

5.3 ALGORITMO DE ALOCAÇÃO TOTAL DE BANDA

Este algoritmo foi proposto para alocar inicialmente toda banda da rede para os SLAs e posteriormente, caso as ONUs não utilizem toda banda, realocar a banda não utilizada. Desta forma, ao contrário dos algoritmos anteriores que alocam inicialmente uma banda garantida (CIR) para todas as ONUs e realoca a banda extra (EIR), este algoritmo distribui a banda total da rede (PIR) em porcentagens para os SLAs. O intuito é garantir que os SLAs não precisem competir pela banda extra (EIR), caso todas as ONUs solicitem somente o valor máximo da banda garantida. A soma da banda garantida de todos os SLAs é a capacidade da rede (1,25 Gbps). A seguir será apresentada a alocação de banda deste algoritmo.

A banda que será alocada ($B'_{alocada}$) para cada ONU é composta pela banda garantida ($B'_{garantida}$) e banda extra (B'_{extra}), conforme (11). O número da prioridade (SLA) é representado por t , tal que $t = 1$ é prioridade alta, $t = 2$ prioridade média e $t = 3$ prioridade baixa. Esta equação é similar a (5). No entanto, a banda garantida será distribuída utilizando a porcentagem de banda total (PIR) destinada ao SLA.

$$B'_{alocada} = B'_{garantida} + B'_{extra} \quad (11)$$

A quantidade da porcentagem da banda total (PIR) que será alocada para cada SLA é definida por W_t , conforme

$$B'_{porcentagem_total} = B_{total} W_t \quad (12)$$

A banda garantida representa a porcentagem de banda total que será alocada para cada ONU de acordo com o seu SLA. Nesta alocação, será atribuída a porcentagem da banda total da rede ($B'_{porcentagem_total}$) para a ONU verificando o tamanho da fila (Q) e seu SLA. Se o tamanho da fila for menor ou igual à porcentagem de banda total destinada ao SLA, a ONU receberá a quantidade de banda solicitada ao OLT, ou seja, Q . Isto é realizado para evitar desperdício de banda. Se o tamanho da fila for maior, será alocada a $B'_{porcentagem_total}$ e o excedente será disputado seguindo os critérios da banda extra (B'_{extra}), de acordo com

$$B'_{garantida} = \begin{cases} B'_{porcentagem_total} \cdot Q > B'_{porcentagem_total} \\ Q; Q \leq B'_{porcentagem_total} \end{cases} \quad (13)$$

Se a quantidade de banda alocada no passo (13) não atingiu a capacidade do sistema (PIR), então a banda não utilizada será realocada dinamicamente para as ONUs que necessitam de mais banda, conforme

$$B_{n\tilde{a}o_utilizada} = B_{total} - \sum_{i=1}^k B'_{garantida} \quad (14)$$

na qual B_{total} é a banda total da rede (PIR) e k representa o número de ONUs.

A banda extra é alocada para as ONUs que necessitem de mais banda que a banda garantida para cada SLA. Se isto ocorrer e existir mais banda que a requerida, $B_{n\tilde{a}o_utilizada} \geq (Q - B'_{garantida})$, a ONU receberá a quantidade de banda que solicitou (Q). Se existir menos, $(Q - B'_{garantida}) > B_{n\tilde{a}o_utilizada}$, toda banda disponível irá ser alocada. Caso a banda

garantida seja suficiente para suprir a quantidade de banda solicitada pela ONU, não será necessário alocar banda extra. Toda alocação de banda extra é realizada respeitando as prioridades de alocação (SLAs), conforme

$$B_{extra}^t = \begin{cases} (Q - B_{garantida}^t); Q > B_{garantida}^t & e B_{n\tilde{a}o_utilizada} \geq (Q - B_{garantida}^t) \\ B_{n\tilde{a}o_utilizada}; (Q - B_{garantida}^t) > B_{n\tilde{a}o_utilizada} \\ 0; B_{garantida}^t > Q \end{cases} \quad (15)$$

Nas subsecções seguintes iremos analisar o comportamento deste algoritmo para porcentagens diferentes de banda para os três tipos de SLAs.

5.3.1 SIMULAÇÃO 1

Nesta simulação, utilizamos os parâmetros da Tabela 6 e 16 e os resultados obtidos podem ser observados nas Figuras 35 e 36. Como podemos observar na Figura 35, o atraso médio de pacotes do SLA₃, torna-se acentuado devido a maior quantidade de banda garantida alocada para os SLAs 1 e 2 (Tabela 16 coluna banda garantida total). Com isto, os atrasos dos SLAs 1 e 2 são menores. Se compararmos as colunas de banda garantida total das Tabelas 16 e 17, coluna de banda total em 100 % de carga, referente ao SLA₁ (primeira linha), perceberemos que não foi utilizada toda banda destinada a este SLA, e esta banda é realocada para os SLAs 2 e 3, sendo o SLA₂ o mais beneficiado.

Tabela 16. Prioridades dos SLAs, distribuição das ONUs, porcentagem de banda total e banda garantida total.

| SLA | Prioridade | ONUs | Porcentagem de Banda Total (%) | Banda Garantida Total (Mbps) |
|--------------|------------|--------|--------------------------------|------------------------------|
| 1 | Alta | 1 a 4 | 50 | 625 |
| 2 | Média | 5 a 8 | 30 | 375 |
| 3 | Baixa | 9 a 16 | 20 | 250 |
| Total | | | | 1250 |

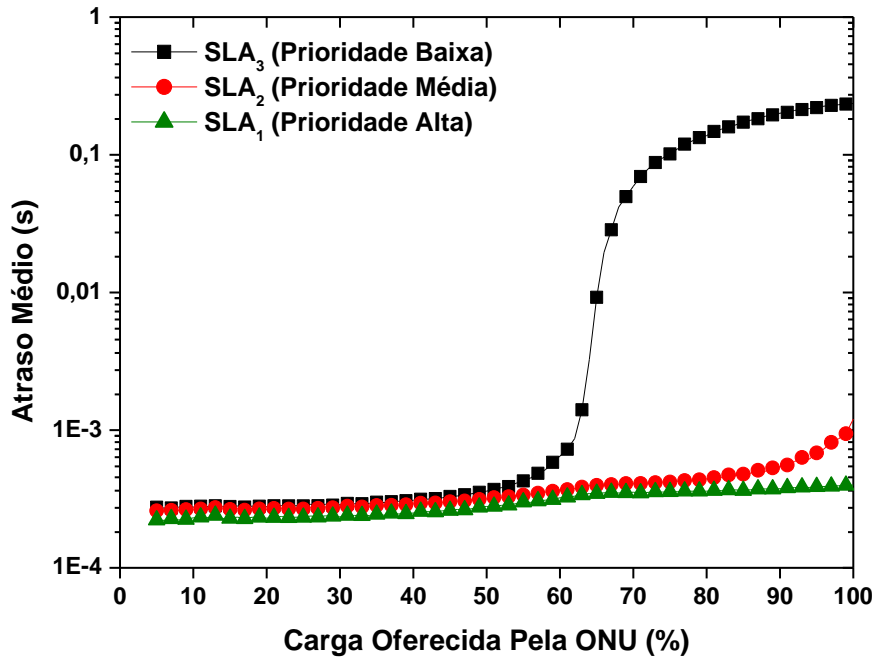


Figura 35. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para os 3 SLAs e um contêiner de tráfego. A sequência de prioridade de SLA é mostrada na Tabela 16 e os parâmetros da simulação na Tabela 6.

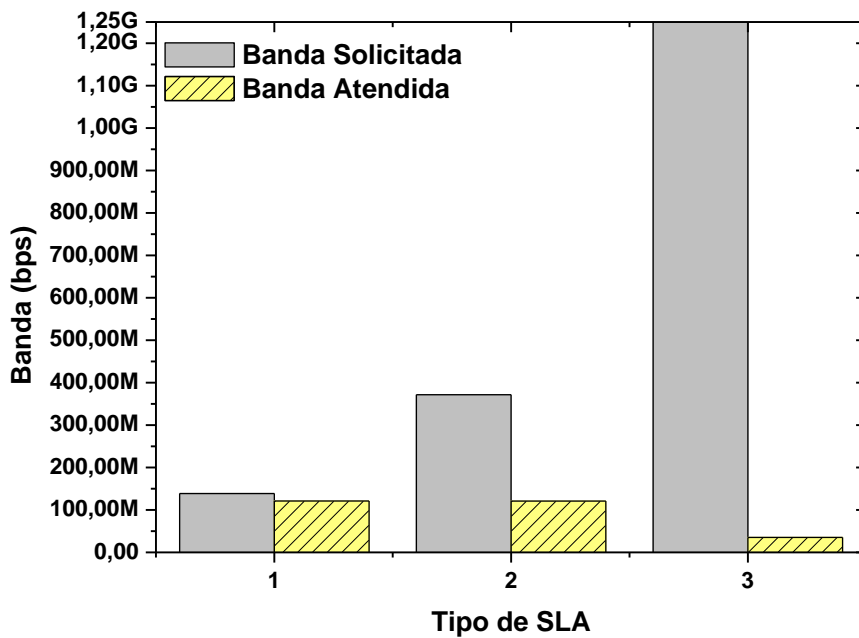


Figura 36. Bandas solicitadas e atendidas por SLA pela quantidade média de solicitações da rede. Calculada para 100% de carga oferecida por ONU, um contêiner de tráfego e média de cinco simulações.

Tabela 17. Prioridades dos SLAs, atraso médio para 100% de carga por ONU (ms), número de ONUs por SLA e banda garantida em 100 % de carga (Mbps).

| SLA | Atraso Médio para 100% de carga por ONU (ms) | Número de ONUs por SLA | Banda em 100 % de carga (Mbps) | Banda Total em 100 % de carga (Mbps) |
|-----|--|------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 0,399 | 4 | 121 | 484 |
| 2 | 1,2 | 4 | 120,9 | 483,6 |
| 3 | 235,8 | 8 | 35,3 | 282,4 |
| | | | Total | 1250 Mbps |

5.3.2 SIMULAÇÃO 2

Como o SLA_1 não utiliza toda banda destinada a ele (comparar as colunas de banda garantida total das Tabelas 16 e 17 referente ao SLA_1 , primeira linha), o SLA_2 é beneficiado com a banda restante e o SLA_3 é prejudicado com esta alocação. Então, vamos alterar as porcentagens de alocação para 40% ($W_1=0,4$) para SLA_1 ; 30% ($W_2=0,3$) para SLA_2 ; e 30% ($W_3=0,3$). Assim, tentaremos alocar de maneira mais equilibrada a banda da rede. As Tabelas 6 e 18 listam os dados utilizados na simulação.

Esta simulação segue a mesma tendência das anteriores, quanto mais banda é alocada para o SLA_3 , maior os atrasos para os demais SLAs devido à redução de banda. Os valores mostrados nas Figuras 37 e 38 referem-se à média de 5 simulações realizadas. Um resultado interessante que pode ser visto na Figura 38 é o aumento da banda solicitada pelo SLA_1 . Este SLA pode solicitar até 500 Mbps e utiliza apenas 484 Mbps. No entanto, as solicitações aumentam quando comparadas com a simulação anterior. Isto ocorre porque quanto mais banda disponível o SLA tem, menos solicitações de banda serão requisitadas. Em situações onde o tráfego é intenso, este SLA requisitará mais banda que o disponível (500 Mbps), ocasionando solicitações de banda. A Tabela 19 lista os resultados apresentados nesta simulação.

Tabela 18. Prioridades dos SLAs, distribuição das ONUs, porcentagem de banda total e banda garantida total.

| SLA | Prioridade | ONUs | Porcentagem de Banda Total (%) | Banda Garantida Total (Mbps) |
|-----|------------|--------|--------------------------------|------------------------------|
| 1 | Alta | 1 a 4 | 40 | 500 |
| 2 | Média | 5 a 8 | 30 | 375 |
| 3 | Baixa | 9 a 16 | 30 | 375 |
| | | | Total | 1250 |

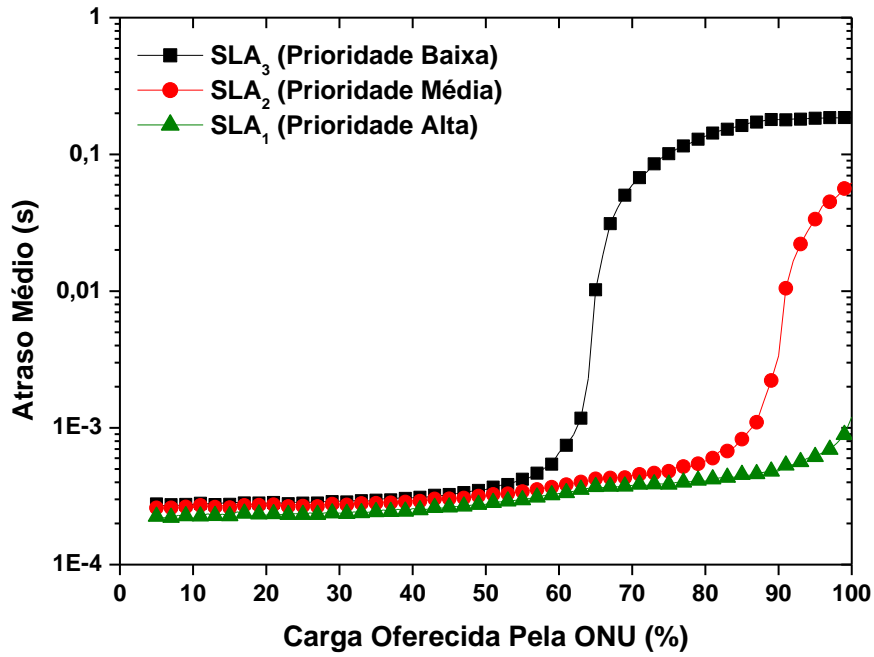


Figura 37. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para os 3 SLAs e um contêiner de tráfego. A sequência de prioridade de SLA é mostrada na Tabela 18 e os parâmetros da simulação na Tabela 6.

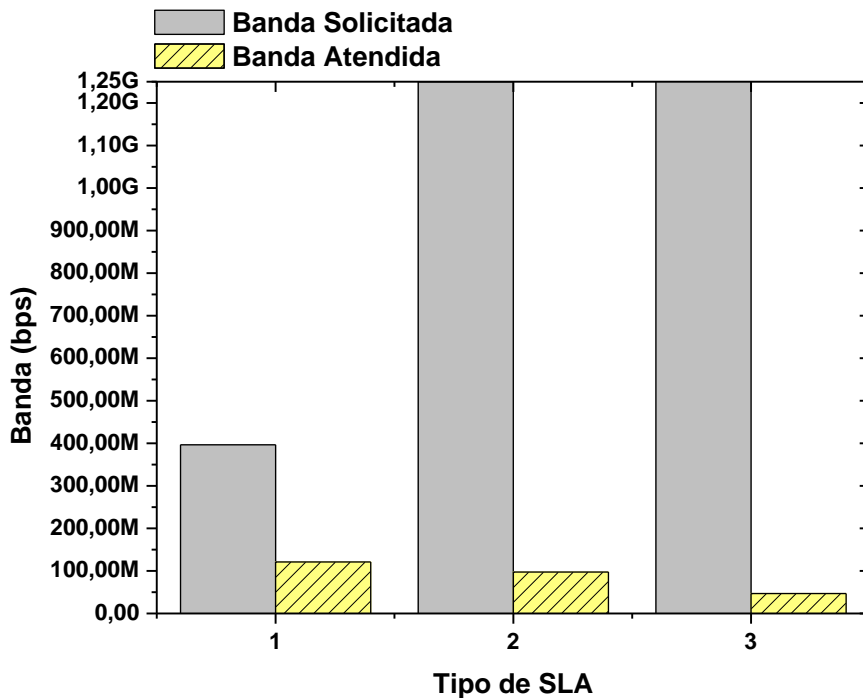


Figura 38. Bandas solicitadas e atendidas por SLA pela quantidade média de solicitações da rede. Calculada para 100% de carga oferecida por ONU, um contêiner de tráfego e média de cinco simulações.

Tabela 19. Prioridades dos SLAs, atraso médio para 100% de carga por ONU (MS), número de ONUs por SLA, banda garantida em 100 % de carga (Mbps).

| SLA | Atraso Médio para 100% de carga por ONU (ms) | Número de ONUs por SLA | Banda em 100 % de carga (Mbps) | Banda Total em 100 % de carga (Mbps) |
|-----|--|------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 1,2 | 4 | 121 | 484 |
| 2 | 61,9 | 4 | 97,7 | 390,8 |
| 3 | 184,99 | 8 | 46,9 | 375,2 |
| | | | Total | 1250 Mbps |

Na próxima simulação dividimos igualmente a banda total da rede (1,25 Gbps) para todas as ONUs e verificamos o comportamento da rede utilizando o algoritmo sem ponderação. Isto é realizado para observarmos o comportamento da banda extra em tráfego intenso.

5.4 DIVISÃO DA BANDA TOTAL DA REDE PARA TODAS AS ONUS

Nesta simulação, utilizamos o algoritmo sem ponderação para avaliar a utilização da banda extra quando a rede chega próximo ao ponto crítico, em 65% da carga oferecida pela ONU. A partir deste valor, torna-se crítico porque há um tráfego intenso nas ONUs e estas necessitam de mais banda para suprir a demanda. No entanto, a banda total da rede (1,25 Gbps) está perto de ser alcançada e todas as ONUs utilizam a banda garantida destinada a ela. Como a banda garantida não é suficiente para atender toda demanda de tráfego, as ONUs tentam utilizar a banda extra, caso exista banda não utilizada. Então, dividimos igualmente a banda garantida para todas as ONUs ($1250 \text{ Mbps} / 16 \text{ ONUs} = 78,1 \text{ Mbps}$), de forma que, se todas as ONUs utilizarem a banda garantida não haverá banda extra, e assim iremos verificar o impacto da banda extra quando todas as ONUs necessitam de banda. A Tabela 20 lista os resultados da simulação e os resultados obtidos. As Figuras 39 e 40 ilustram, respectivamente, os atrasos referentes a esta simulação e a quantidade de solicitações e atendimentos de banda.

Tabela 20. Prioridades dos SLAs, atraso médio para 100% de carga por ONU (ms), número de ONUs por SLA, banda garantida e extra em 100 % de carga (Mbps).

| SLA | Atraso Médio para 100% de carga por ONU (ms) | Número de ONUs por SLA | Banda Garantida (Mbps) | Banda Extra (Mbps) | Banda em 100 % de carga (Mbps) | Banda Total em 100 % de carga (Mbps) |
|-----|--|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 105,81 | 4 | 78,125 | 0 | 78,125 | 312,5 |
| 2 | 106,06 | 4 | 78,125 | 0 | 78,125 | 312,5 |
| 3 | 106,11 | 8 | 78,125 | 0 | 78,125 | 625 |
| | | | | | Total | 1250 Mbps |

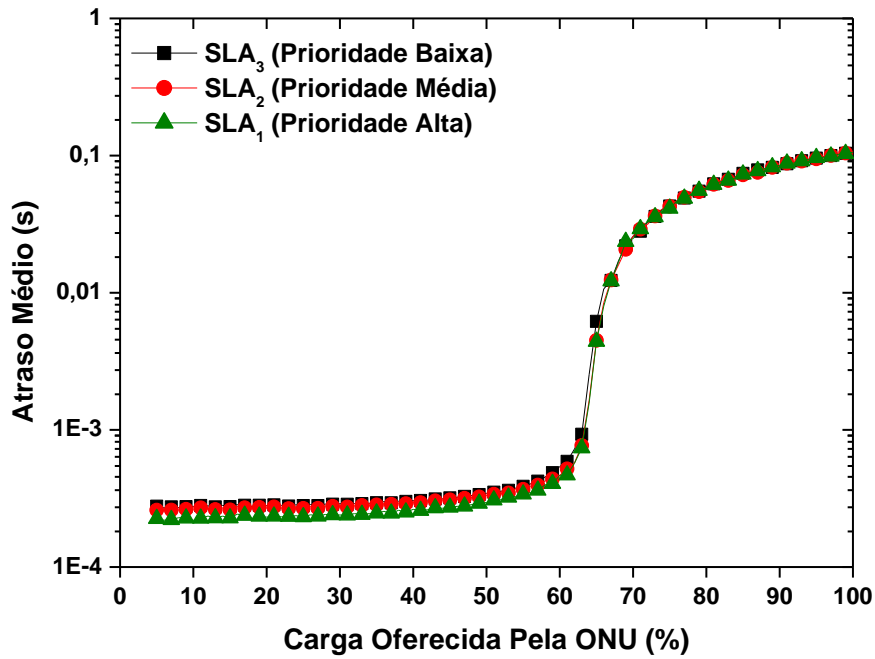


Figura 39. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para os 3 SLAs e um contêiner de tráfego. A sequência de prioridade de SLA é mostrada na Tabela 20 e os parâmetros da simulação na Tabela 6.

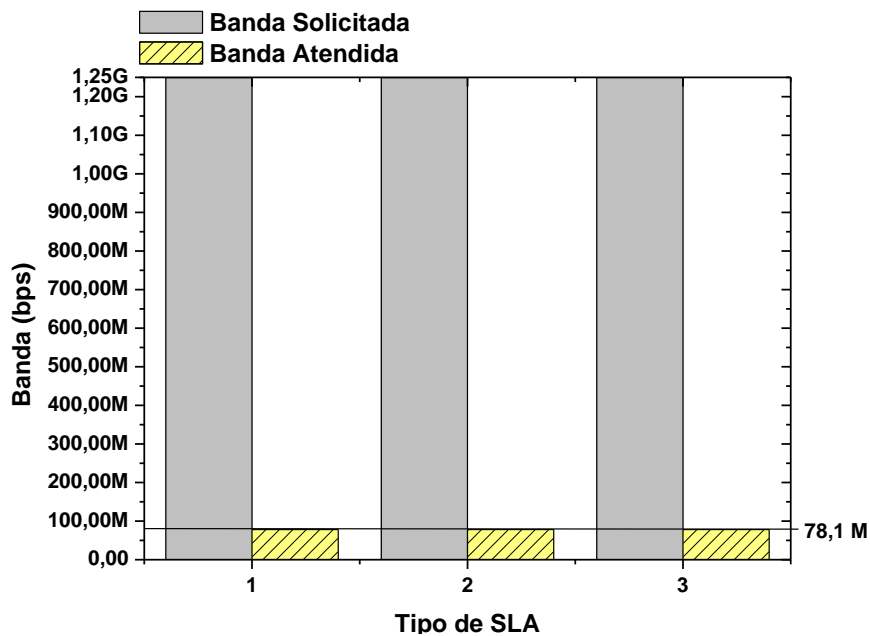


Figura 40. Bandas solicitadas e atendidas por SLA pela quantidade média de solicitações da rede. Calculada para 100% de carga oferecida por ONU, um contêiner de tráfego e média de cinco simulações. A linha horizontal delimita a quantidade de banda garantida e a quantidade de banda extra. Abaixo desta linha temos a banda garantida e acima a banda extra.

Como podemos observar na Figura 39, para carga da rede abaixo de 65%, percebemos uma pequena diferenciação de atrasos entre os SLAs. Isto ocorre porque poucas ONUs utilizam a banda garantida e, desta forma, sobra banda para ser realocada na banda extra. A partir de 65 %, quando a demanda de tráfego aumenta e todas as ONUs utilizam a banda garantida (78,125 Mbps), não sobra banda para ser alocada na banda extra. Assim, os atrasos referentes aos SLAs são praticamente iguais.

Desta forma, podemos concluir que quando a carga da rede se aproxima do ponto crítico, a partir de 65 %, as prioridades de alocação de banda estabelecidas pelos algoritmos implementados irão ser fundamentais para diferenciar os atrasos de cada SLA.

Nas seções seguintes inserimos em nossa implementação um intervalo para o processamento do algoritmo de alocação dinâmica de banda (DBA) relacionado ao ciclo de interrogação. Este intervalo torna as simulações mais realista porque os equipamentos que implementam o DBA necessitam de um intervalo para o processamento das requisições de banda.

5.5 SIMULAÇÃO DE UMA REDE GPON COM INTERVALO DE PROCESSAMENTO DO DBA

Para tornar as simulações condizentes com o hardware da OLT inserimos em nossa implementação um intervalo para o processamento do algoritmo de alocação dinâmica de banda (DBA) relacionado ao ciclo de interrogação. Este intervalo é referente à atualização dos *time slots*. Isto ocorre quando a OLT recebe o mapa de banda (US BW Map, Figura 9) das ONUs informando a quantidade de bytes necessários para o próximo ciclo e o DBA inicia o processamento destas informações. Durante este intervalo, o fluxo de tráfego *downstream* e *upstream* continuam ocorrendo, sem atualização dos *time slots*. Então, a cada ciclo de interrogação que os *time slots* não são atualizados, as ONUs recebem a mesma quantidade de banda do ciclo anterior. Se uma ONU solicitar no instante t_2 uma quantidade de banda menor que no instante t_1 , e os *time slots* não forem atualizados, ela receberá mais banda que o necessário. De forma similar, se uma ONU no instante t_2 solicitar mais banda que no instante t_1 , ela receberá a mesma quantidade de banda do ciclo anterior, ocasionando aumento do número de pacotes nos contêineres e, conseqüentemente, maior atraso no envio de pacotes.

Para minimizar os atrasos causados pelo intervalo de processamento do DBA implementamos em nossas simulações uma banda extra, calculada a partir da banda não

utilizada, que é adicionada no momento da atualização do *time slot* para todas as ONUs. O intervalo de processamento do DBA torna as simulações mais realista porque os equipamentos que implementam o DBA necessitam de um intervalo para o processamento das requisições de banda. A Figura 41 ilustra uma transmissão com tempo de processamento do DBA relacionada ao ciclo de interrogação.

No instante t_1 o mapa de banda, contido no cabeçalho PCBd, é enviado para todas as ONUs informando a quantidade de banda disponível para a transferência dos pacotes. O tamanho dos *time slots* está na Tabela de banda 1 da Figura 41. Ao receber o mapa de banda, no instante t_2 , cada ONU começa a enviar os pacotes para a OLT e, ao final, especifica no campo DBA, contido no bloco DBRu, a quantidade de banda necessária para o próximo ciclo. Quando o pacote chega à OLT, no instante t_3 , o DBA inicia o processamento para definir a quantidade de banda que será alocada para o próximo ciclo. No entanto, como os tráfegos *downstream* e *upstream* continuam ocorrendo e o DBA ainda está processando a quantidade de banda para cada ONU, os *time slots* não serão atualizados e o ciclo de interrogação 2 continua com as mesmas informações do ciclo de interrogação 1 (comparar a coluna bytes das Tabelas de banda 1 e 2 e notar que os *time slots* não foram atualizados). No instante t_4 , as ONUs recebem o mapa de banda contendo a quantidade de bytes destinada para a transmissão dos pacotes. Ao final, é informado no campo DBA, contido no bloco DBRu, a quantidade de bytes que ela precisará para o próximo ciclo. A ONU 1 solicita 1800 bytes, a ONU 2, 1350 bytes e a ONU 3, 1100 bytes, observar na Figura 41. Como podemos observar, no instante t_5 a OLT recebe os pacotes contendo a banda necessária para o próximo ciclo, mas como o DBA ainda está processando as requisições de pedido de banda do ciclo de interrogação 1, as informações de banda no instante t_5 são ignoradas (observar as Tabelas de banda 1 e 3). O terceiro ciclo é similar ao segundo. As ONUs recebem os *time slots*, no instante t_6 e inicia a transmissão dos pacotes contidos nos contêineres e, ao final, informa a quantidade de banda necessária para o próximo ciclo. No instante t_7 , o DBA termina o processamento e atualização dos *time slots* para o próximo ciclo. No entanto, estas informações são referentes ao ciclo de interrogação 1 (comparar as Tabelas de banda 1 e 4 e notar que os *time slots* foram atualizados). No instante t_7 , o mapa de banda que será enviado às ONUs está atualizado com as informações do instante t_3 (ciclo de interrogação 1).

A seguir serão apresentadas as simulações realizadas utilizando o intervalo para o processamento do DBA descrito.

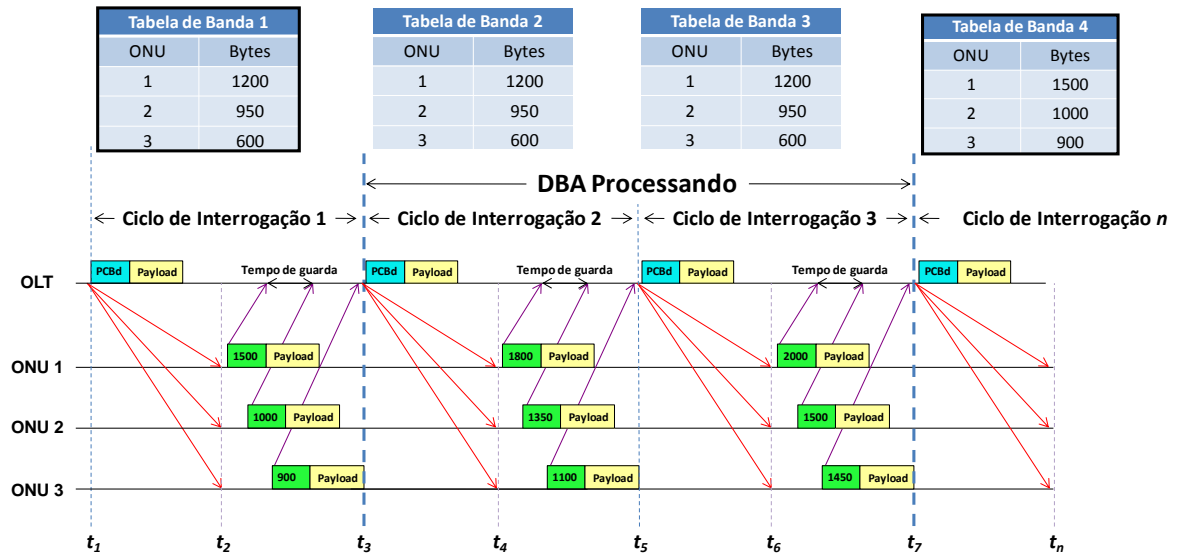


Figura 41. Transmissão de dados com intervalo de processamento do DBA relacionada ao ciclo de interrogação.

5.5.1 SIMULAÇÃO 1

Para as simulações seguintes modificamos o algoritmo com ponderação, apresentado na Seção 5.2, inserindo o intervalo de processamento do DBA relacionado ao ciclo de interrogação, como descrito na seção anterior. Escolhemos este algoritmo para verificar o comportamento do atraso médio de pacotes quando variamos a quantidade de banda garantida e a porcentagem de banda extra para os SLAs.

Os intervalos de processamento do DBA são definidos com base na quantidade de ciclos de interrogação. Para cada ciclo sem atualização o intervalo de processamento do DBA é $250 \mu\text{s}$, sendo $125 \mu\text{s}$ referente ao sentido *downstream* e $125 \mu\text{s}$ ao sentido *upstream*. Então, para 5 ciclos sem atualização o atraso é $5 \times 250 \mu\text{s} = 1,25 \text{ ms}$. Nas simulações seguintes comparamos uma rede GPON com e sem intervalo de processamento do algoritmo de alocação de banda.

Inicialmente, definimos para esta simulação a banda garantida de 20 Mbps para todas as ONUs e as porcentagens de banda extra que será alocada para todas as prioridades: 50% ($W_1=0,5$) para SLA_1 ; 30% ($W_2=0,3$) para SLA_2 ; e 20 ($W_3=0,2$) para SLA_3 , como apresentado na Tabela 21. Os parâmetros utilizados são listados na Tabela 6.

Tabela 21. Dados para simulação do DBA com e sem intervalo de processamento relacionado aos ciclos de interrogação. Prioridade dos SLAs, distribuição das ONUs, banda garantida e porcentagem de banda extra.

| SLA | Prioridade | ONUs | Banda Garantida (Mbps) | Porcentagem de Banda Extra (%) |
|-----|------------|--------|------------------------|--------------------------------|
| 1 | Alta | 1 a 4 | 20 | 50 |
| 2 | Média | 5 a 8 | 20 | 30 |
| 3 | Baixa | 9 a 16 | 20 | 20 |

Para visualizar os atrasos causados pelos intervalos de processamento do DBA, apresentamos nas Figuras 42 a 44 os resultados das simulações referentes aos SLAs 1, 2 e 3, respectivamente, com intervalos de processamento do algoritmo de alocação dinâmica de 1 a 5 e também de 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego. Nestas figuras percebemos que o aumento dos atrasos no envio de pacotes para a OLT está relacionado com a quantidade de ciclos de interrogação sem atualização. Na Figura 42 verificamos que a diferença entre os atrasos das simulações com atualização constante e 10 ciclos sem atualização é 1,3 ms. Então, quanto maior o intervalo de processamento do DBA, maior os atrasos no envio de pacotes. Nas simulações seguintes analisamos os atrasos médios de pacotes e a quantidade de banda utilizada para os três SLAs com intervalo de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego.

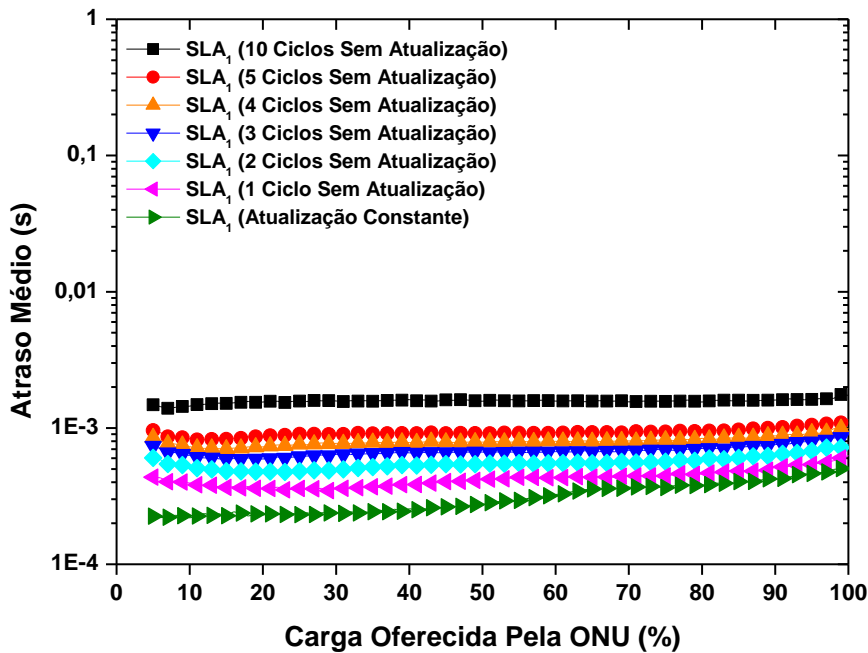


Figura 42. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA₁ para intervalo de processamento do DBA de 1 a 5 e também de 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego.

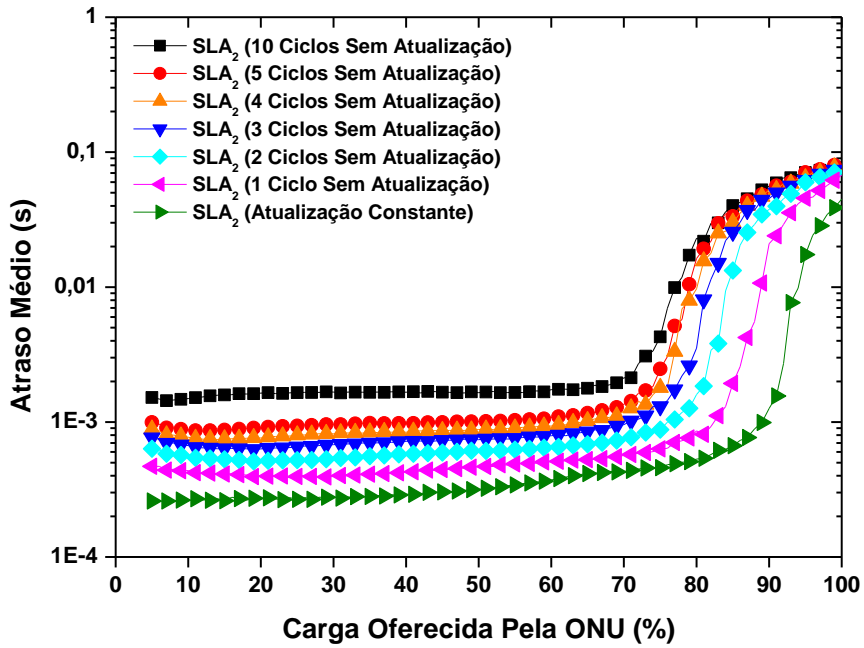


Figura 43. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA₂ para intervalo de processamento do DBA de 1 a 5 e também de 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego.

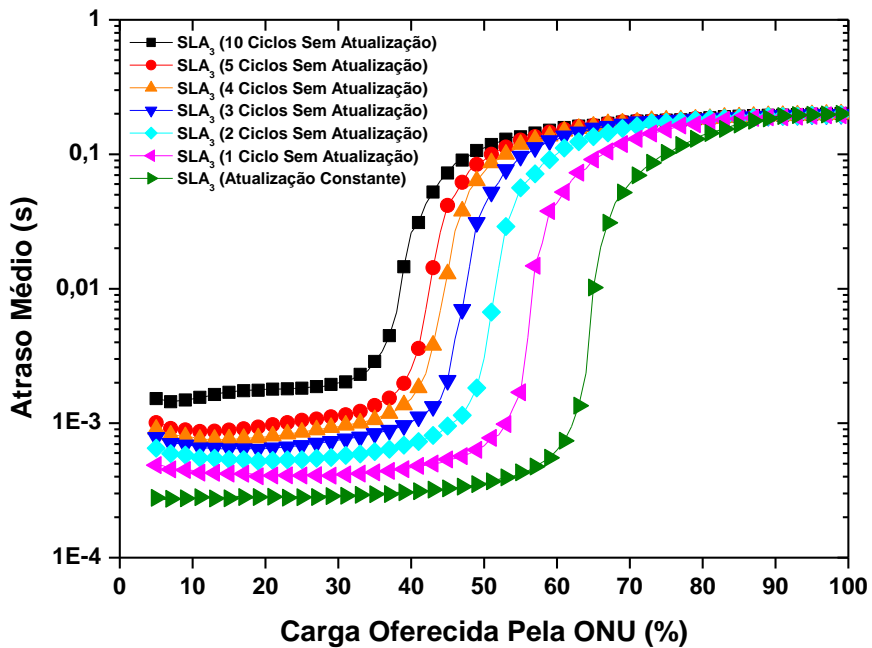


Figura 44. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA₃ para intervalo de processamento do DBA de 1 a 5 e também de 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego.

A Figura 45 ilustra o atraso médio de pacotes para o SLA₁ com e sem intervalo de processamento do DBA relacionado ao ciclo de interrogação. Como o SLA₁ tem prioridade sobre os demais SLAs e recebe uma grande quantidade de banda, os atrasos são menores. No entanto, podemos notar a diferença no atraso médio de pacotes quando o intervalo de

processamento do DBA aumenta. Isto se deve à demora para atualizar os *time slots*. Em nossas simulações implementamos 2, 5 e 10 ciclos de interrogação sem atualização dos *time slots*, logo os tempos para que ocorra a atualização são 0,5 ms, 1,25 ms e 2,5 ms.

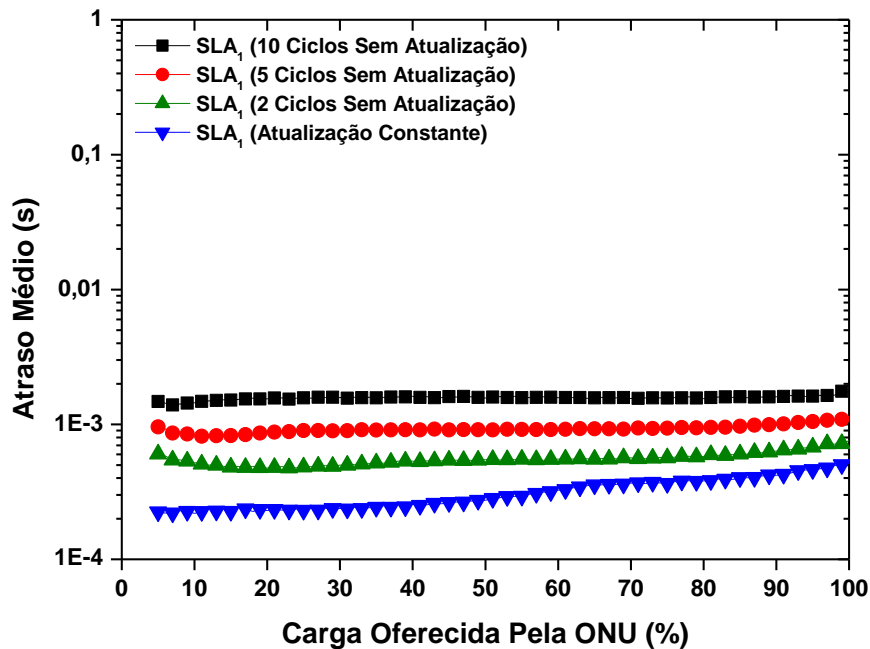


Figura 45. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA₁ para intervalo de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego.

A Figura 46 mostra o atraso médio de pacotes para o SLA₂ com e sem intervalo de processamento do DBA. Como podemos perceber, os atrasos no envio de pacotes são mais evidentes até 75% da carga da ONU. Isto ocorre porque existe banda disponível para ser alocada para as ONUs e as diferenças de intervalo de processamento do DBA influenciam no atraso de envio dos pacotes. A partir deste valor, o tráfego da rede torna-se intenso e as ONUs sempre requisitam toda a capacidade da rede.

Em nossas simulações percebemos que os intervalos de processamento do DBA de 2 até 10 ciclos de interrogação sem atualização nos *time slots* têm atrasos similares no envio de pacotes quando o tráfego é intenso. Isto ocorre porque as ONUs sempre requisitam toda a largura de banda da rede e qualquer atraso adicional afeta no envio de pacotes. De acordo com a Figura 46, a curva com atualização constante apresenta menor atraso que as demais em situação de tráfego intenso, pois os *time slots* são atualizados constantemente, evitando qualquer desperdício de banda.

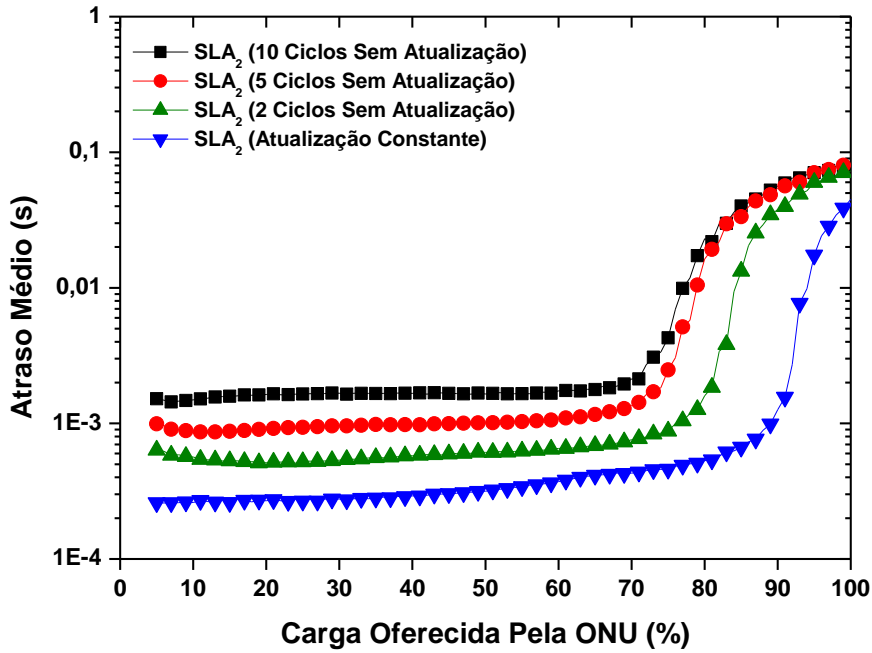


Figura 46. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA₂ para intervalo de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego.

A Figura 47 ilustra o atraso médio de pacotes para o SLA₃ com e sem intervalo de processamento do DBA. Como podemos perceber nesta figura, quando não existe o intervalo de processamento do DBA a banda destinada a este SLA é totalmente aproveitada (observar na Figura 47 a curva SLA₃ com atualização constante). No entanto, quando temos intervalos de processamento do algoritmo de alocação de banda de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação, o atraso torna-se acentuado. Se compararmos as curvas dos SLAs com o processamento de 2, 5 e 10 ciclos sem atualização, percebemos que até 50% da carga oferecida pela ONU quanto maior são os ciclos de interrogação sem atualizar dos *time slot* maior também são os atrasos no envio de pacotes para a OLT. Isto ocorre porque a banda destinada para este SLA é menor, quando comparada com os demais. Então, qualquer aumento no intervalo de processamento para atualização dos *time slots* acarreta maior atraso no envio de pacotes.

A Figura 48 mostra a quantidade de banda solicitada e atendida pelo SLA₃ com e sem intervalo de processamento do DBA para 50% de carga. Nesta figura, o SLA₃ com atualização constante solicita 53 Mbps e recebe 50 Mbps, assim, toda banda é aproveitada e o atraso médio é 0,356 ms. No entanto, para as simulações com 2, 5 e 10 ciclos de interrogação sem atualização do *time slots* fica claro o aumento no atraso de envio de pacotes. Para a simulação com 2 ciclos de interrogação sem atualização do *time slot* a banda solicitada é 568 Mbps e a banda atendida é 62 Mbps. Nesta simulação percebemos que a quantidade de banda atendida é maior quando comparada com a simulação utilizando a atualização constante. No

entanto, como a quantidade de banda solicitada é maior, os atrasos no envio de pacotes aumentam. Para os intervalos de processamento do DBA de 5 e 10 ciclos de interrogação sem atualização do *time slots*, a banda solicitada nos dois casos é 1,25 Gbps e as bandas atendidas são 48 Mbps e 45 Mbps, respectivamente. Então, quanto maior o intervalo para atualizar os *time slots*, mais acentuados os atrasos. A Tabela 22 lista os atrasos médios de pacotes para 100% de carga com e sem intervalo de processamento do DBA para três SLAs.

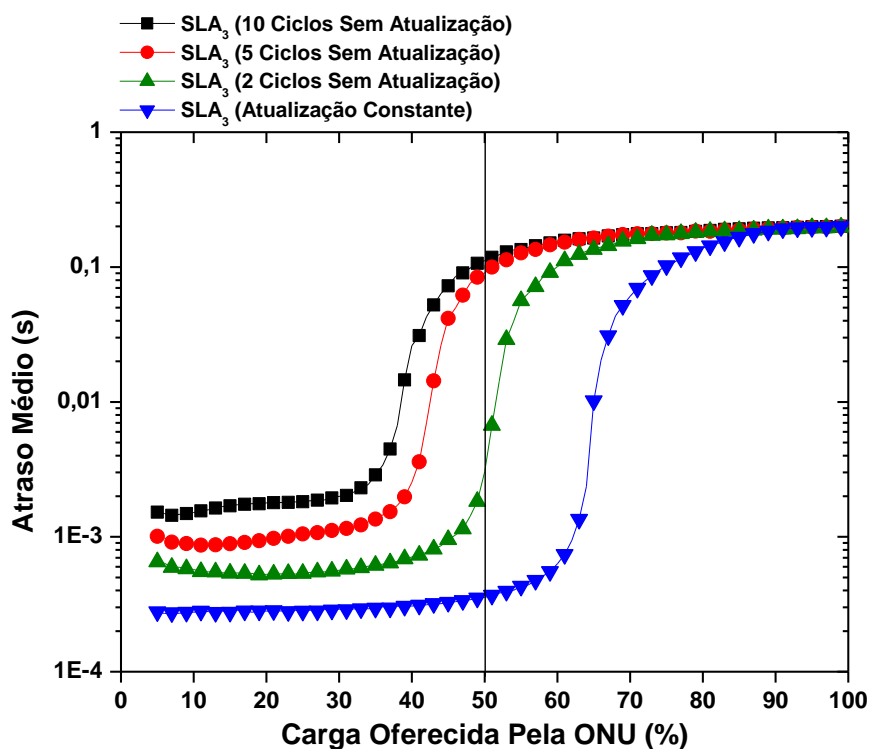


Figura 47. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA₃ com intervalos de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego. A linha vertical representa o atraso médio para 50% de carga oferecida pela ONU. Esta linha é para ressaltar a localização dos pontos retirados para a geração do gráfico da Figura 48, na qual analisamos as bandas solicitadas e atendidas por ONU.

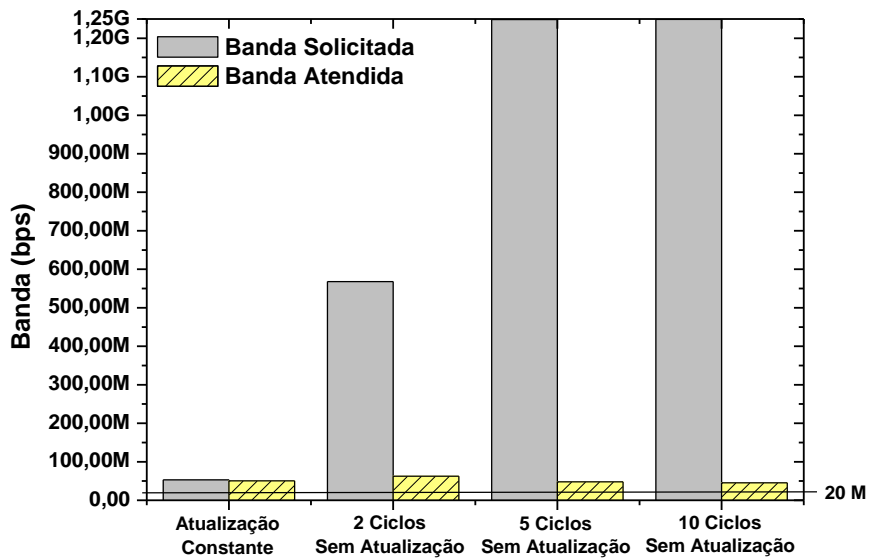


Figura 48. Bandas solicitadas e atendidas pelo SLA₃ para 50% de carga oferecida pela ONU com e sem intervalo de processamento do DBA. Estes resultados foram baseados em cinco simulações com um contêiner. A linha horizontal delimita a quantidade de banda garantida e a quantidade de banda extra. Abaixo desta linha temos a banda garantida e acima a banda extra.

Tabela 22. Atraso médio de pacotes em relação ao intervalo do processamento do DBA para os SLAs em 100% de carga por ONU.

| Atualização no processamento do DBA | Atraso Médio (ms) | | |
|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | SLA ₁ (Alta) | SLA ₂ (Média) | SLA ₃ (Baixa) |
| 10 Ciclos Sem Atualização (2,5 ms) | 1,740 | 81,24 | 200,95 |
| 5 Ciclos Sem Atualização (1,25ms) | 1,150 | 78,84 | 200,78 |
| 2 Ciclos Sem Atualização (0,5ms) | 0,758 | 72,65 | 200,41 |
| Atualização Constante | 0,517 | 44,92 | 197,72 |

5.5.2 SIMULAÇÃO 2

Nesta simulação alteramos a banda garantida de 20 Mbps para 40 Mbps e a distribuição das porcentagens de banda extra que será alocada para cada prioridade é a mesma da simulação anterior: 50% ($W_1=0,5$) para SLA₁; 30% ($W_2=0,3$) para SLA₂; 20 ($W_3=0,2$) para SLA₃. Isto foi feito para verificarmos o comportamento do atraso quando aumentamos a banda garantida. Como podemos observar na Figura 49, a simulação com os tempos no processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos tornam-se acentuados a partir de 90 % da carga oferecida pela ONU, quando comparamos estes resultados com a Figura 45. Isto acontece porque com esta configuração a banda é distribuída para os SLAs de forma mais equilibrada. Assim, o SLA₁ recebe menos banda e, conseqüentemente, sofre mais atrasos.

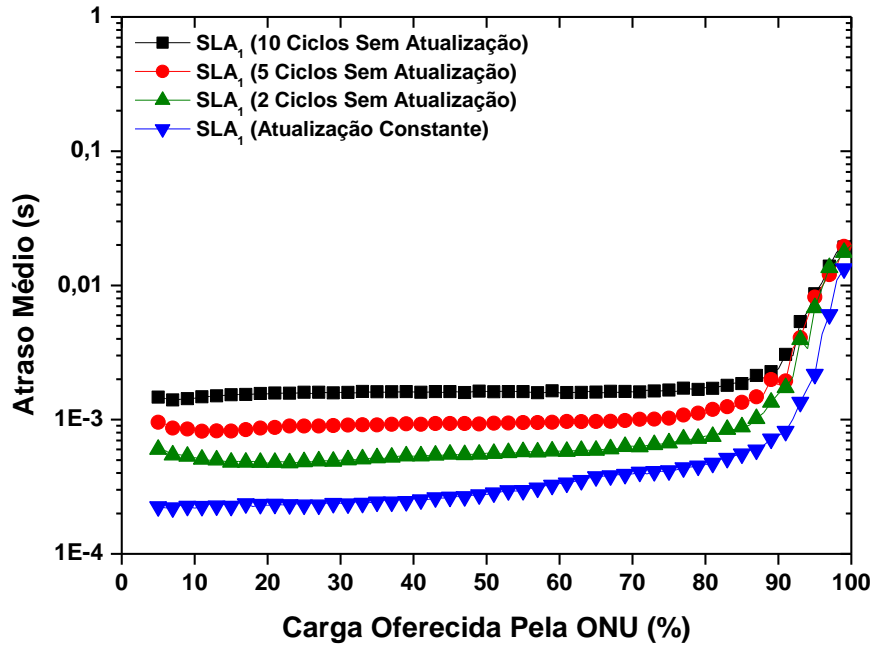


Figura 49. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA₁ para intervalos de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego.

A Figura 50 ilustra o atraso médio de pacotes do SLA₂ com e sem intervalo de processamento do DBA. Esta simulação segue a mesma tendência da anterior, pois quanto maior a quantidade de banda que será alocada para este SLA menor será o atraso e as curvas de ciclos de interrogação sem atualização de *time slots* se aproximam da curva com atualização constante. Então, quanto mais equilibrada for a distribuição de banda para todos os SLAs, menor será a diferença entre os atrasos de envio de pacotes quando temos atualização constante de *time slot* e intervalos de processamento do DBA.

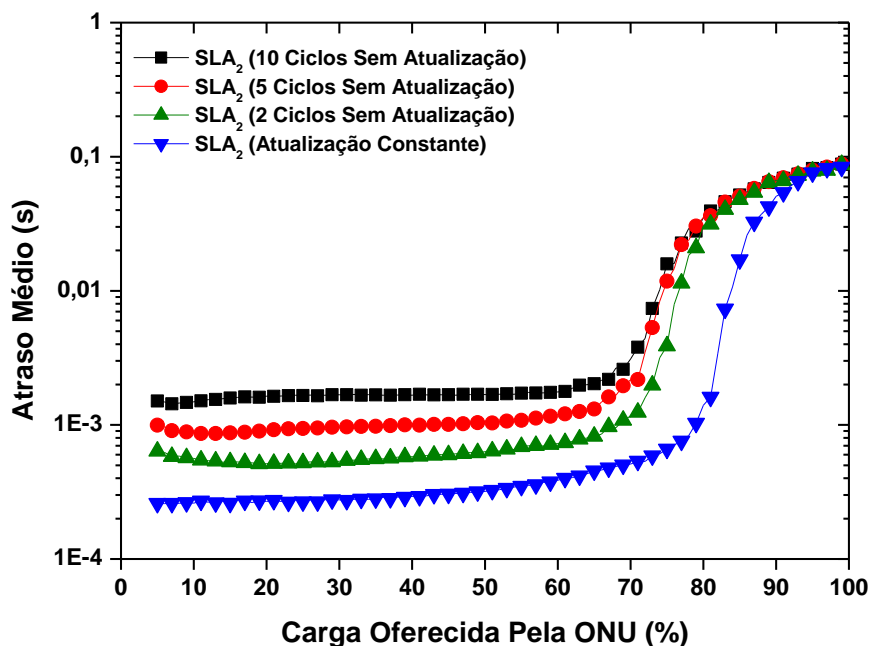


Figura 50. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA₂ com intervalos de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego.

Na Figura 51 são apresentados os resultados da simulação para o atraso médio de pacotes do SLA₃ em relação ao intervalo de processamento do DBA. Como o SLA₃ é o menos favorecido em relação à quantidade de banda, os atrasos para a transmissão de pacotes são mais significativos para este SLA. Se compararmos os resultados da Figura 47 com os da Figura 51 percebemos que os atrasos de pacotes diminuiriam com o aumento de banda para este SLA. Isto pode ser mais bem visualizado quando comparamos as Figuras 48 e 52 que mostram as bandas solicitadas e atendidas pelo SLA₃ para 50% de carga oferecida pela ONU com e sem intervalo de processamento do DBA.

A Figura 52 mostra a quantidade de banda solicitada e atendida pelo SLA₃ com e sem intervalo de processamento do DBA para 50% de carga. Nesta figura, o SLA₃ com atualização constante solicita 53 Mbps e recebe 50 Mbps, assim, toda banda é aproveitada e o atraso médio é 0,356 ms. No entanto, para as simulações com 2, 5 e 10 ciclos de interrogação sem atualização do *time slots* fica claro o aumento no atraso de envio de pacotes. Para a simulação com 2 ciclos de interrogação sem atualização a banda solicitada é 245,8 Mbps e a banda atendida é 66,6 Mbps. Como mencionamos, a banda atendida para esta simulação é maior quando comparada com a simulação que utiliza a atualização constante. Isto ocorre porque a demanda de banda solicitada é maior e a quantidade de ciclos de interrogação sem atualização é menor, quando comparada com os atrasos de 5 e 10 ciclos de interrogação sem atualização. Para os intervalos de processamento do DBA de 5 e 10 ciclos de interrogação

sem atualização dos *time slots*, as bandas solicitadas são 1,03 Gbps e 1,17 Gbps e as bandas atendidas são 60,5 Mbps e 59,6 Mbps, respectivamente. Como nesta simulação a banda é distribuída de forma mais equilibrada, as ONUs do SLA₃ recebem mais banda e, conseqüentemente, fazem menos requisições. Isto pode ser visto comparando as requisições de banda feitas pelo SLA₃ nas Figura 48 e 52. A Tabela 23 lista os atrasos médios de pacotes para 100% de carga com e sem intervalo de processamento do DBA para três SLAs.

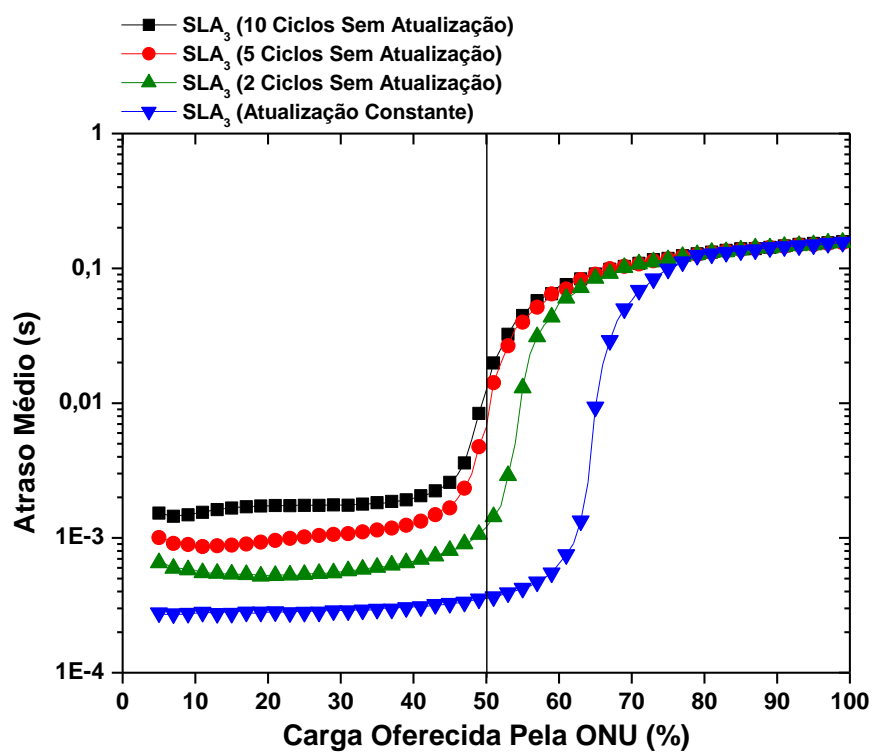


Figura 51. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA₃ com intervalo de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego. A linha vertical representa o atraso médio para 50% de carga oferecida pela ONU. Esta linha é para ressaltar a localização dos pontos retirados para a geração do gráfico da Figura 52, na qual analisamos as bandas solicitadas e atendidas por ONU.

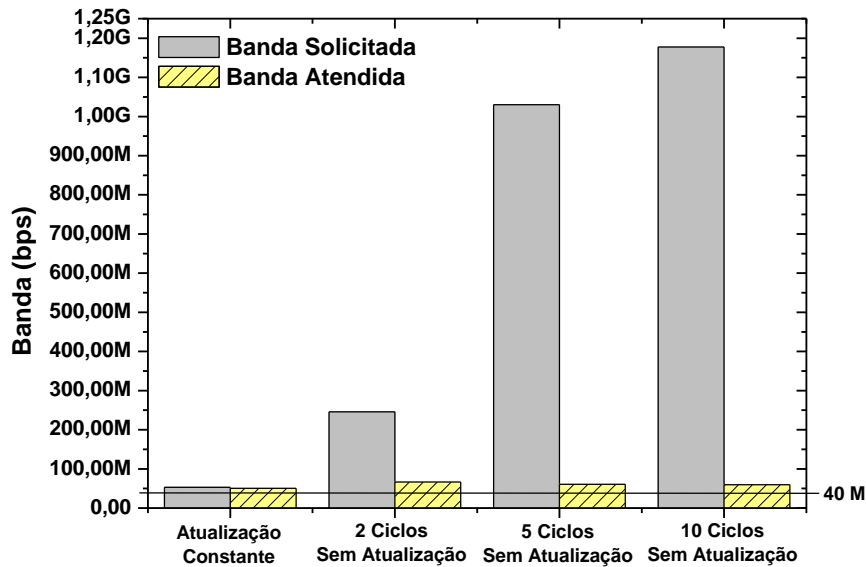


Figura 52. Bandas solicitadas e atendidas pelo SLA₃ para 50% de carga oferecida pela ONU com e sem intervalo de processamento do DBA. Estes resultados foram baseados em cinco simulações contendo um contêiner. A linha horizontal delimita a quantidade de banda garantida e a quantidade de banda extra. Abaixo desta linha temos a banda garantida e acima a banda extra.

Tabela 23. Atraso médio dos pacotes em relação ao intervalo do processamento do DBA para os SLAs em 100% de carga por ONU.

| Atualização no processamento do DBA | Atraso Médio (ms) | | |
|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | SLA ₁ (Alta) | SLA ₂ (Média) | SLA ₃ (Baixa) |
| 10 Ciclos Sem Atualização (2,5 ms) | 21,81 | 89,04 | 158,93 |
| 5 Ciclos Sem Atualização (1,25ms) | 20,31 | 88,49 | 157,86 |
| 2 Ciclos Sem Atualização (0,5ms) | 19,96 | 89,10 | 156,78 |
| Atualização Constante | 13,76 | 87,23 | 155,15 |

5.5.3 SIMULAÇÃO 3

Como o SLA₃ tem menos prioridade na alocação da banda extra, alteramos as porcentagens para: 40% ($W_1=0,4$) para SLA₁; 30% ($W_2=0,3$) para SLA₂; e 30% ($W_3=0,3$). Desta forma, podemos analisar o comportamento dos SLAs quando temos menos banda para o SLA₁ e mais banda extra para o SLA₃. As Tabelas 6 e 14 listam os dados utilizados na simulação.

As Figuras 53 e 54 ilustram o atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para os SLAs 1 e 2 com intervalos de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego. Como a banda garantida é 40 Mbps para cada ONUs (40 Mbps x 16 ONUs = 640 Mbps), então a banda extra que será distribuída para cada SLA é 610 Mbps. Destes, $W_1 = 244$ Mbps, $W_2 = 183$ Mbps e $W_3 = 183$ Mbps. Logo, a banda é dividida de forma mais equilibrada resultando em maiores atrasos para os SLAs 1 e 2.

Como podemos perceber pela Figura 56, a quantidade de banda solicitada diminuiu, quando comparamos com a Figura 52, e a quantidade de banda atendida aumentou. Isto se deve à alocação de banda mais equilibrada para todos os SLAs. Para o atraso de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação sem atualização do *time slots* as bandas solicitadas são 181 Mbps, 340 Mbps e 477 Mbps e as bandas atendidas são 69,8 Mbps, 65,3 Mbps e 64,7 Mbps, respectivamente. Esta configuração beneficia o SLA₃, no entanto, podemos perceber que os intervalos de processamento do DBA continuam influenciando os atrasos e as quantidades de bandas atendidas, pois verificamos nas Figuras 55 e 56 que os resultados com atualização constante dos *time slots* resultam em atrasos menores e quantidades maiores de banda atendidas. A Tabela 24 lista os atrasos médios de pacotes para 100% de carga com e sem intervalo de processamento do DBA para três SLAs.

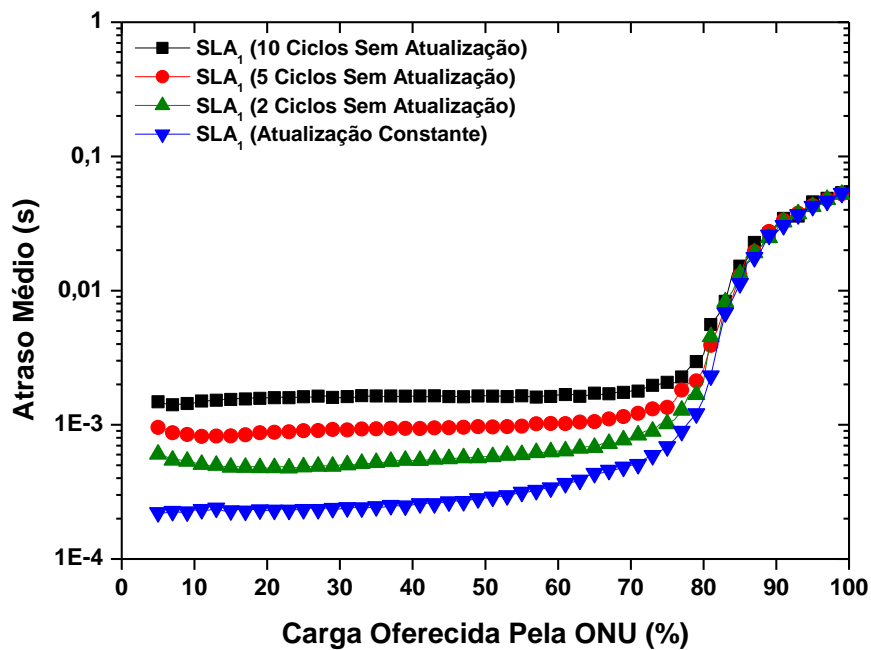


Figura 53. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA₁ com intervalo de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego.

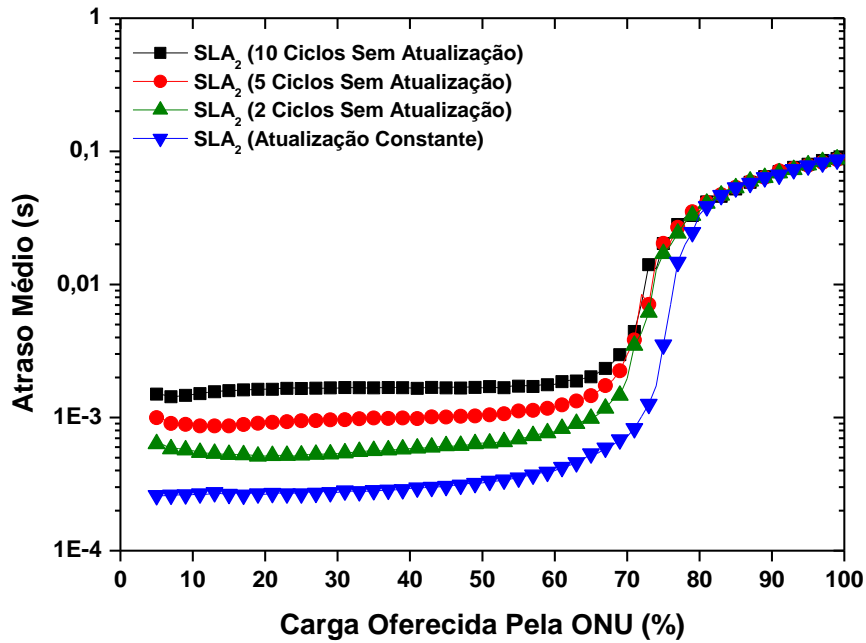


Figura 54. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA₂ com intervalo de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego.

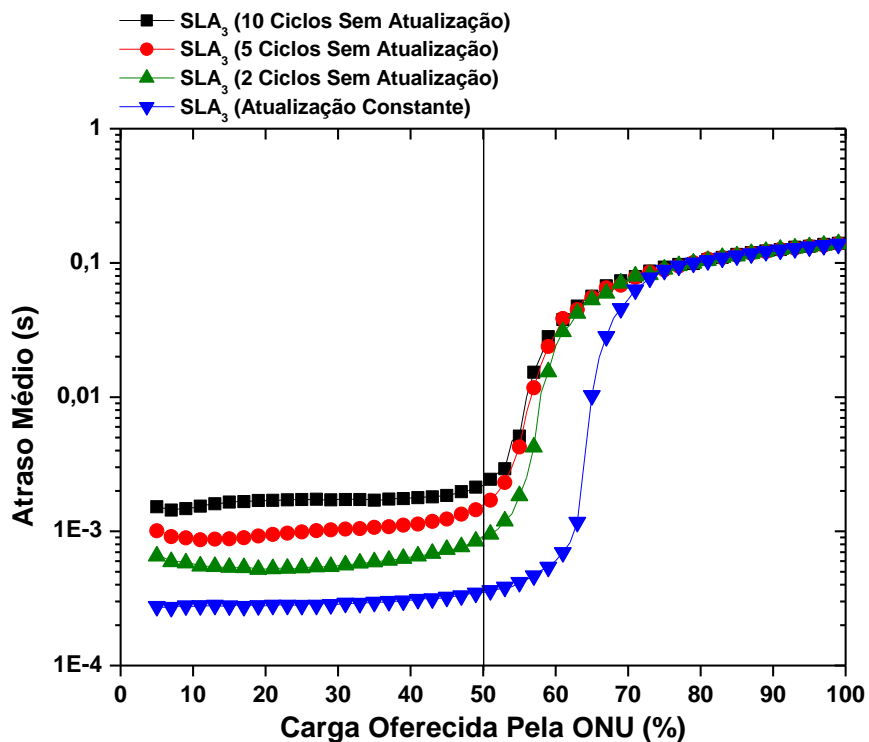


Figura 55. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA₃ com intervalo de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego. A linha vertical representa o atraso médio para 50% de carga oferecida pela ONU. Esta linha é para ressaltar a localização dos pontos retirados para a geração do gráfico da Figura 56, na qual analisamos as bandas solicitadas e atendidas por ONU.

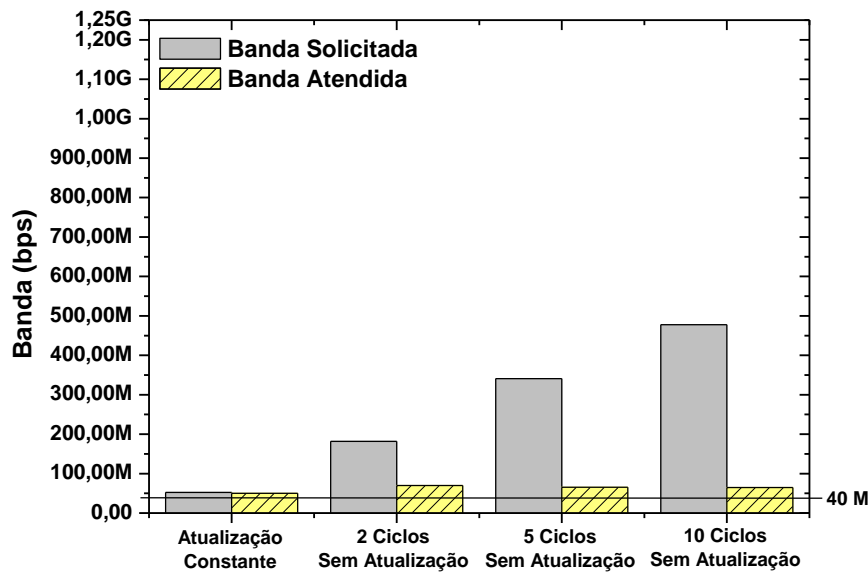


Figura 56. Bandas solicitadas e atendidas pelo SLA₃ para 50% de carga oferecida pela ONU com e sem intervalo de processamento do DBA. Estes resultados foram baseados em cinco simulações contendo um contêiner. A linha horizontal delimita a quantidade de banda garantida e a quantidade de banda extra. Abaixo desta linha temos a banda garantida e acima a banda extra.

Tabela 24. Atraso médio dos pacotes em relação ao intervalo de processamento do DBA para os SLAs em 100% de carga por ONU.

| Atualização no processamento do DBA | Atraso Médio (ms) | | |
|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | SLA ₁ (Alta) | SLA ₂ (Média) | SLA ₃ (Baixa) |
| 10 Ciclos Sem Atualização (2,5 ms) | 56,46 | 90,72 | 141,73 |
| 5 Ciclos Sem Atualização (1,25ms) | 56,28 | 88,79 | 141,57 |
| 2 Ciclos Sem Atualização (0,5ms) | 56,15 | 88,28 | 141,25 |
| Atualização Constante | 52,99 | 88,13 | 140,00 |

As simulações seguintes apresentam uma proposta para minimizar os atrasos causados pelo intervalo de processamento do DBA. Esta é baseada na alocação de uma banda extra no momento da atualização dos *time slots* para todas as ONUs.

5.5.4 ALGORITMO PARA MINIMIZAR O ATRASO CAUSADO PELO INTERVALO DE PROCESSAMENTO DO DBA

Para tentar minimizar os atrasos causados pelo intervalo de processamento do DBA, propomos o acréscimo de uma banda extra quando os *time slots* são atualizados. Esta, é a soma da banda não utilizada dividida pelo número de usuários. Assim, as ONUs irão receber o *time slot* processado pelo DBA e mais uma banda extra adicional.

As Figuras 57 a 59 apresentam o atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para os SLAs 1, 2 e 3 com intervalos de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego. Nestes gráficos apresentamos os

resultados computacionais quando acrescentamos a banda extra no momento da atualização dos *time slots*. Como podemos perceber em todos os gráficos, a banda extra diminui o atraso médio de pacotes até um determinado valor de carga oferecida pela ONU. Para os SLAs 1, 2 e 3 a banda extra minimiza os atrasos até 17, 28 e 46 % de carga oferecida, respectivamente. Isto acontece porque com a desatualização dos *time slots* ocorre aumento na quantidade de pacotes nos contêineres e desta forma as ONUs sempre requisitam uma quantidade maior de banda. Assim, a banda não utilizada que era usada como banda extra passa a não existir. Analisando a Figura 57 para 2 ciclos sem atualização dos *time slots*, percebemos que a curva com banda extra aproxima-se da curva com atualização constante até 31% da carga oferecida pela ONU. Isto é devido ao intervalo de processamento do DBA ser de 2 ciclos de interrogação sem atualização, ou seja, uma quantidade pequena de ciclos sem atualização dos *time slots*. Com o aumento da quantidade de ciclos de interrogação sem atualização dos *time slots*, os atrasos aumentam e a quantidade de banda extra diminui. Isso ocorre porque quanto maior a quantidade de ciclos sem atualização menor a banda extra utilizada na atualização dos *time slots*. Os parâmetros utilizados nessas simulações são listados nas Tabelas 6 e 21.

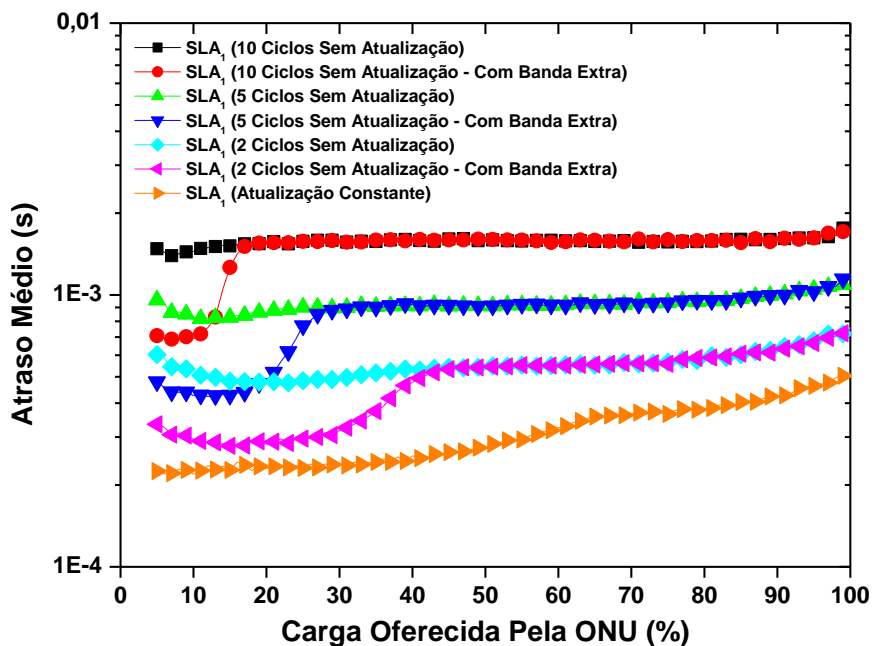


Figura 57. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA₁ com intervalo de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego. Neste gráfico apresentamos os resultados computacionais quando acrescentamos a banda extra no momento da atualização dos *time slots*.

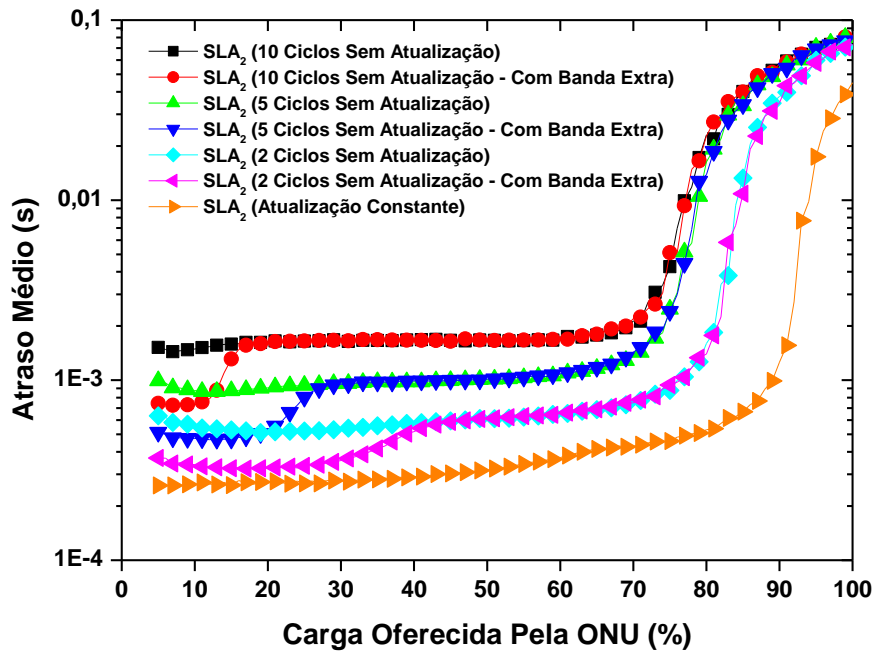


Figura 58. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA₂ com intervalo de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego. Neste gráfico apresentamos os resultados computacionais quando acrescentamos a banda extra no momento da atualização dos *time slots*.

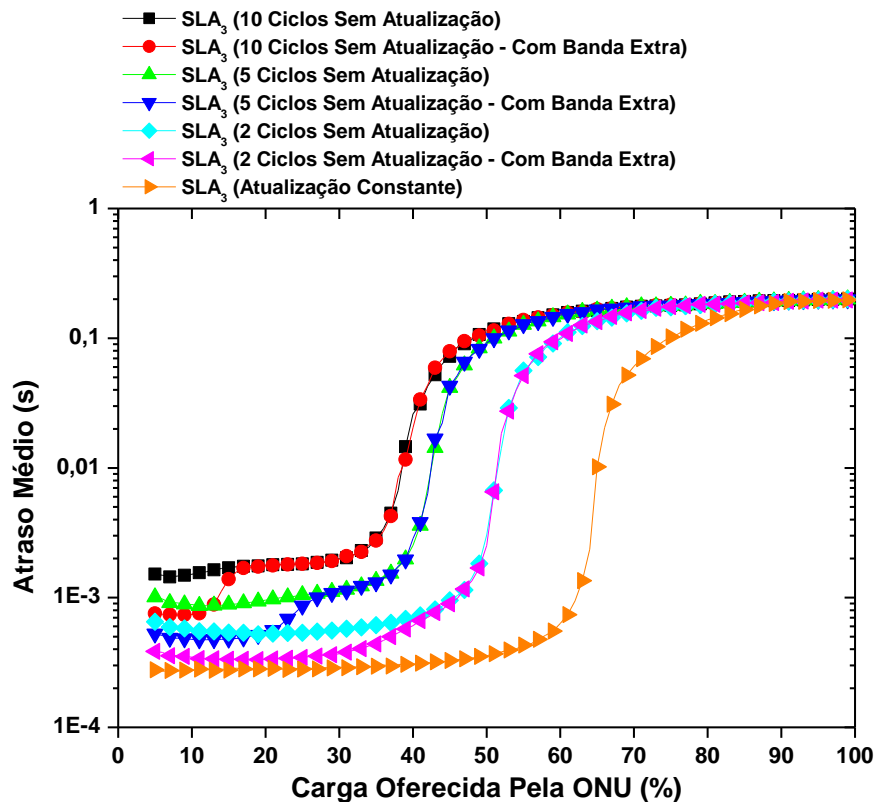


Figura 59. Atraso médio de pacotes em função da carga oferecida por ONU para o SLA₃ com intervalo de processamento do DBA de 2, 5 e 10 ciclos de interrogação e um contêiner de tráfego. Neste gráfico apresentamos os resultados computacionais quando acrescentamos a banda extra no momento da atualização dos *time slots*.

Esta proposta para tentar resolver os atrasos gerados pelo intervalo de processamento do DBA é a mais simples de ser implementada. Como forma de ampliar o estudo, sugere-se analisar outros esquemas de crédito, com a finalidade de obter uma melhor proposta para minimizar os atrasos causados pelo intervalo de processamento do DBA.

CONCLUSÕES

Neste trabalho descrevemos alguns algoritmos de alocação dinâmica de banda para rede de acesso via fibra óptica padrão GPON e taxa máxima 1,25 Gbps. O padrão GPON reúne tráfego semelhante gerado nas ONUs em 4 contêineres que fornecem prioridade para transmissão *upstream*. O objetivo é discutir as diversas possibilidades de alocação de banda, analisando os atrasos médios de pacotes e a quantidade de banda solicitada e atendida em cada cenário apresentado.

Inicialmente, validamos nossa simulação com o algoritmo DMB [13] e, em seguida, propomos um algoritmo que aloca banda garantida para as ONUs e realoca a banda que não foi utilizada de acordo com três SLAs. Ao contrario do algoritmo DMB [13] que estabelece ponderações para as prioridades, o nosso algoritmo realoca toda a banda dinamicamente. A não utilização de ponderações foi definida neste algoritmo, pois diferentes ponderações têm diferentes prioridades, e o nosso intuito era observar o comportamento da rede quando toda banda é gerenciada dinamicamente para todos os SLAs. Os resultados numéricos mostram a eficiência e versatilidade do algoritmo proposto.

Posteriormente, propomos um segundo algoritmo utilizando o conceito de ponderações. Neste, analisamos o comportamento dos atrasos e a quantidade de banda solicitada e atendida por ONU quando a banda garantida e a banda extra são alteradas.

Por fim, inserimos em nossa implementação um intervalo para o processamento do algoritmo de alocação dinâmica de banda (DBA) relacionado ao ciclo de interrogação. Este intervalo torna as simulações mais realista porque os equipamentos que implementam o DBA necessitam de um intervalo para o processamento das requisições de banda. Então, analisamos o atraso médio de pacotes quando variamos o intervalo de processamento do DBA. Ao final, propomos uma solução para minimizar estes atrasos.

Como pesquisas futuras sugerem-se analisar outros esquemas para minimizar os atrasos no envio de pacotes gerados pelos intervalos de processamento do DBA, com a finalidade de obter uma melhor proposta para minimizar os atrasos causados pelo intervalo de processamento do DBA.

APÊNDICE A

A1. DISTRIBUIÇÃO DE POISSON

A forma clássica de modelar tráfego em redes de telecomunicações é por meio de tráfego Poissoniano. Tal modelo é baseado nas redes de telefonia tradicionais, nas quais se considera a independência das chamadas e a duração das chamadas segue um modelo exponencialmente distribuído.

A distribuição discreta de Poisson expressa a probabilidade de que um número de eventos ocorra em um período de tempo fixo, se os eventos ocorrem com taxa média conhecida e são independentes em relação ao tempo.

Seja λ a taxa de chegada (*arrival rate*), que é o número médio de solicitações de chamadas por unidade de tempo. O intervalo médio entre duas chegadas consecutivas é $1/\lambda$.

Seja μ a taxa de serviço. É o número médio de solicitações de chamadas atendidas por unidade de tempo. O intervalo médio de serviço (duração da conexão) é $1/\mu$. Por exemplo, se o intervalo médio de duração de conexões é 6 minutos, então $\mu=6 \text{ (minutos)}/60 \text{ (minutos)}=10$ e $1/\mu=0,1$.

É usual adotar que o intervalo médio de serviço é variável aleatória e sua distribuição é exponencial, $P(S_i < x) = 1 - e^{-\mu x}$, ou seja, é a probabilidade, S_i , de que o intervalo médio de duração seja menor que x .

Também é usual adotar que o intervalo entre chegadas é variável aleatória com distribuição $P(I_i < x) = 1 - e^{-\lambda x}$. Conseqüentemente, o processo de chegada das solicitações é processo Poisson. Para determinar uma variável aleatória x com distribuição exponencial pode-se utilizar uma variável aleatória de distribuição uniforme

$$X = -\frac{\ln(u)}{\lambda} \quad (16)$$

sendo u um número aleatório com distribuição uniforme entre $[0, 1]$.

A probabilidade, $A(t)$, de que até o instante t tenham ocorrido n chegadas é

$$P(A(t) = n) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^n}{n!} \quad (17)$$

Portanto, a chegada ao sistema de uma solicitação de chamada pode ser modelada por distribuição de Poisson com parâmetro λ . A duração média das conexões atendidas (em andamento no sistema) é exponencial com parâmetro μ .

A2. DISTRIBUIÇÃO DE PARETO E TRÁFEGO AUTO-SIMILAR

Um objeto auto-similar é exata ou aproximadamente similar a uma parte de sua composição, ou seja, o objeto completo é parecido com uma ou mais de suas partes, conforme ilustra a Figura 60.

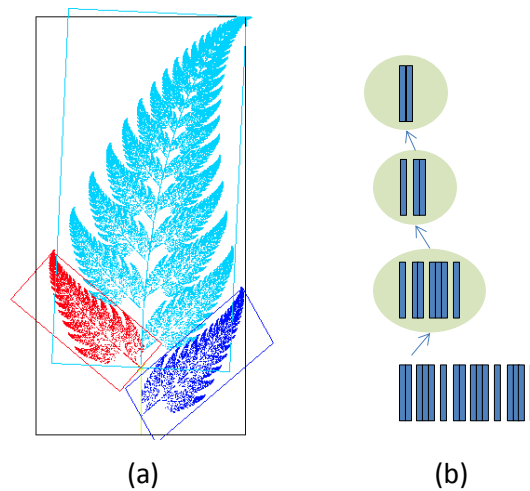


Figura 60. Conceito de auto-similaridade. (a) forma genérica ilustrativa; (b) Rajada formada a partir da agregação de pacotes de bytes.

As chegadas de pacotes (ou de requisições de conexão) são normalmente geradas por entidades independentes. Assim, o processo de chegada é normalmente Poissoniano, de forma que os tempos entre chegadas são exponencialmente distribuídos.

Entretanto, alguns estudos demonstraram [48], [49] que a duração de um pacote (ou conexão) está associada à distribuição de cauda pesada. Desta forma, a auto-similaridade está relacionada ao tempo de duração dos pacotes (ou conexões). Então, utiliza-se a distribuição *bounded* Pareto para determinar a duração dos pacotes, que formará no mínimo um quadro. A distribuição é dada por

$$f(y) = \alpha y^{-\alpha-1} \frac{k^\alpha}{1 - \left(\frac{k}{p}\right)}, \alpha > 0, k \leq y \leq p \quad (18)$$

na qual k e p são, respectivamente, os valores mínimo e máximo, que podem ser atribuídos à variável y ; α é o parâmetro de forma da distribuição, exibindo auto-similaridade quando $0 < \alpha < 2$.

O parâmetro de Hurst, H , é dado por $H=(3-\alpha)/2$ e indica o grau de auto-similaridade da função de distribuição de probabilidade que exhibe LRD (*long-range dependence*) de grau elevado. Para estas funções, $\Pr(X > x) \sim x^{-\alpha}$, para $x \rightarrow \infty, 0 < \alpha < 2$. Os valores do parâmetro de Hurst situam-se na faixa $0,5 < H \leq 1$. Próximo de 0,5 indica que os eventos são não-correlacionados ou exhibe SRD. No outro extremo, 1, indica alto grau de correlação ou LRD. Com base em medições de tráfego em redes padrão Ethernet, $\alpha = 1,4$ é indicado para gerar os períodos ON.

Para gerar o comprimento de uma rajada y utilizamos

$$y = \frac{k}{\left\{ 1 + u \left[\left(\frac{k}{p} \right)^\alpha \right] - 1 \right\}^{\frac{1}{\alpha}}}, \quad (19)$$

na qual u é variável com distribuição uniforme entre 0 e 1. O intervalo entre as rajadas segue distribuição exponencial.

A3. SIMULAÇÃO DO TRÁFEGO

Nas simulações, para gerar o tamanho dos quadros utilizou-se uma distribuição trimodal, similar àquela observada nas redes de longa distância e redes de acesso. Estes modos principais correspondem aos tamanhos de quadro mais freqüentes: 53 bytes (46%), 582/594 bytes (10%) e 1518 bytes (12%) [20]. O tamanho mínimo da rajada foi fixado em $k=1.000$ pacotes e o máximo em $p=1.000.000$ pacotes e o fator de forma em $\alpha=1,4$.

A chegada de rajadas é simulada por meio de distribuição Poissoniana. Portanto, para gerar tráfego de rajadas é utilizada combinação de distribuição Poissoniana e de Pareto limitada.

A Figura 61 mostra a geração de tráfego utilizando o modelo auto-similar para dois valores de carga de tráfego. Para intervalo médio entre chegadas $1/\lambda=3$, o comprimento médio das rajadas é o mesmo, mas o intervalo médio entre as rajadas é maior.

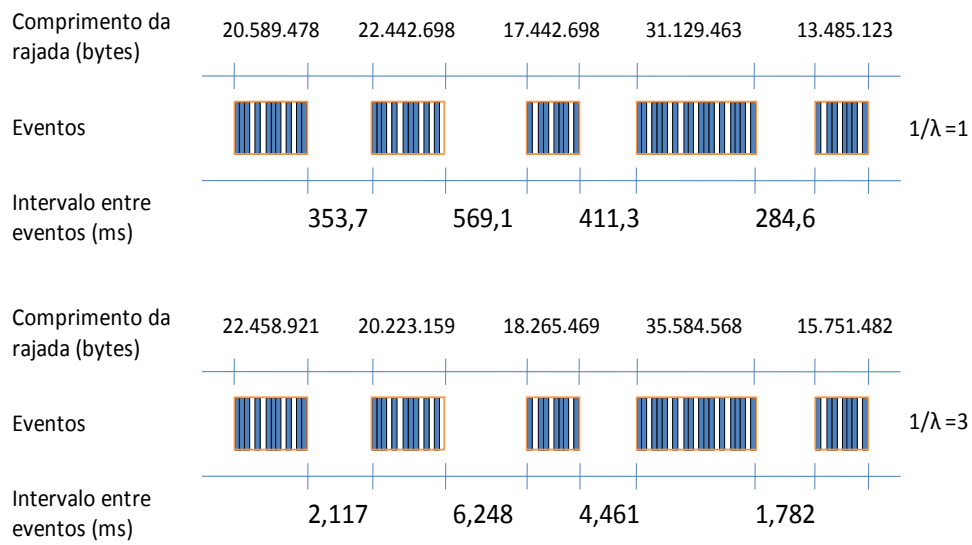


Figura 61. Geração de rajadas utilizando modelo Pareto limitado. Os parâmetros de simulação são: $1/\lambda=1$ e $1/\lambda=3$. Tamanho mínimo dos pacotes: 53 bytes; tamanho máximo: 1518 bytes; tamanho mínimo da rajada: $k=1.000$ pacotes; tamanho máximo: $p=1.000.000$; fator de forma: $\alpha=1,4$.

REFERÊNCIAS

- [1] R. W. Heron et al., “Technology Innovations and Architecture Solutions for the Next-Generation Optical Access Network”, Bell Labs Technical Journal, vol. 13, pp. 163–182, março 2008.
- [2] C. F. Lam, “Passive Optical Network: Principles and Practice”, Elsevier Inc, 2007.
- [3] <https://www.ieeecommunities.org/epon>.
- [4] <http://www.itu.int/rec/T-REC-G/e>.
- [5] ITU-T Recommendation G.984.3, "Gigabit-capable passive optical networks (GPON): transmission convergence layer specification", 2008.
- [6] I. Cale, A. Salihovic e M. Ivekovic, “Gigabit Passive Optical Network – GPON”, Proceedings of the ITI 2007 29th Int. Conf. on Information Technology Interfaces, Cavtat, Croácia, pp. 25-28, junho 2007.
- [7] A. Banerjee, et al., “Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review [Invited]”, Journal of Optical Networking, vol. 4, n. 11, pp. 737-758, novembro 2005.
- [8] S. Gianordoli, M. Rasztoivits-Wiech, A. Stadler e R. Grabenhorst, “Next generation PON”, Journal e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, Springer Wien, vol. 123, n. 3, março 2006.
- [9] J. I. Kani, F. Bourgart, A. Cui, A. Rafel, R. Davey e S. Rodrigues, “Next-generation PON-Part I: Technology roadmap and general requirements”, IEEE Communications Magazine, pp. 43-49, Novembro 2009.
- [10] Relatório anual CPqD, http://www.cpqd.com.br/component/docman/doc_download/10-relatorio-anual-2008.html, 2008 (data de acesso, fevereiro de 2010).
- [11] L. Yang, Z. Guoping e L. Qing, “An Improved Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm for GPON”, Photonics and Optoelectronics, pp. 1-4, agosto 2009.
- [12] C. H. Chang, “Dynamic Bandwidth Allocation MAC Protocols for Gigabit-capable Passive Optical Networks”, tese de doutorado, University of Hertfordshire, Julho, 2008.
- [13] C. H. Chang, P. Kourtessis, e J. M. Senior, "GPON service level agreement based dynamic bandwidth assignment protocol," Electronics Letters, vol. 42, pp. 1173-1174, 2006.

- [14] H. C. Leligou, C. Linardakis, K. Kanonakis, J. D Angelopoulos e T. Orphanoudakis, “Efficient medium arbitration of FSAN-compliant GPONs: Research Articles”, *International Journal of Communication Systems*, vol. 19, pp. 603-617, junho 2006.
- [15] K. Kanonakis e I. Tomkos, “Efficient scheduling disciplines for next generation QoS-aware GPON networks”, *International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON*, vol.4, pp. 135-138, junho 2008.
- [16] J. Jiang, M. R. Handley e J. M. Senior, “Dynamic bandwidth assignment MAC protocol for differentiated services over GPON”, *Electronics Letters*, 25th, vol. 42, pp. 653-655, Maio 2006.
- [17] S. Choi e J. Huh, “Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm for Multimedia Services over Ethernet PONs”, *ETRI Journal*, vol. 24, n. 6, pp. 465-468, Dezembro 2002.
- [18] Y. Luo e N. Ansari “Bandwidth Allocation for Multiservice Access on EPONs”, *IEEE Optical Communications*, vol. 43, n. 2, pp. 16-21, fevereiro 2005.
- [19] A. Hadjiantonis, S. Sherif, A. Khalil, T. Rahman, G. Ellinas, M. F. Arend, e M. A. Ali, “A Novel Decentralized Ethernet-Based PON Access Architecture for Provisioning Differentiated QoS”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, n. 11, pp. 2483-2497, novembro 2004.
- [20] G. Kramer, B. Mukherjee, S. Dixit, Y. Ye “Supporting differentiated classes of service in Ethernet passive optical networks”, *Journal of Optical Networking*, vol. 1, N° 9, pp. 280-298, agosto 2002.
- [21] J. Zheng e H. T. Mouftah, “An Adaptive MAC Polling Protocol for Ethernet Passive Optical Networks”, *IEEE International Conference – ICC*, vol. 3, pp. 1874-1878, maio 2005.
- [22] G. Kramer, B. Mukherjee, e G. Pesavento, "IPACT a dynamic protocol for an Ethernet PON (EPON)", *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, pp. 74-80, 2002.
- [23] L. B. Lage e M. C. A. Oliveira, “Estudo de uma Rede de Acesso Via Fibra Óptica”, monografia, Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, 2006.
- [24] G. Kramer, B. Mukherjee, e G. Pesavento, “Ethernet PON (EPON): Design and Analysis of an Optical Access Network”, *Photonic Network Communications*, vol. 3, N° 3, pp. 307-319, julho 2001.
- [25] C. O. C. Arbieto, “Alocação dinâmica de largura de banda em redes EPON”, dissertação de mestrado da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

- [26] C. H. Lee, V. S. Wayne e B. Y. Kim, “Fiber to the Home Using a PON Infrastructure”, *J. Lightwave Technol*, pp. 4568-4583, dezembro 2006.
- [27] T. Koonen, “Fiber to the home/fiber to the premises: What, Where and When?”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, n. 5, maio 2006.
- [28] K. Fouli e M. Maier, “OCDMA and optical coding: Principles, applications, and challenges”, *IEEE Communication Magazine*, vol. 45, n. 8, pp. 27–34, agosto 2007.
- [29] G. Keiser, “FTTX Concepts and Applications”, Wiley, N.J. Hoboken, 2006.
- [30] Full Service Access Networks, <http://www.fsanweb.org/> (data de acesso, fevereiro de 2010)
- [31] ITU-T G.983.x, The leader on BPON standards, <http://www.itu.int/itudoc/gs/promo/tsb/83121.pdf> (data de acesso, fevereiro de 2010).
- [32] ITU-T Recommendation G.983.3, “A broadband optical access system with increased service capability by wavelength allocation”, 2001.
- [33] ITU-T Recommendation G.983.3, “A broadband optical access system with increased service capability by wavelength allocation”, 2002.
- [34] David Gutierrez, Kyeong Soo Kim, Salvatore Rotolo, Fu-Tai An and Leonid G. Kazovsky, “FTTH Standards, Deployments e Research Issues”, 8th Joint Conference on Information Sciences; Symposium on Photonics, Networking and Computing, Seção: PNC-5 Optical Communications, pp. 1358-1361, julho 2005.
- [35] IEEE 802.3ah, Ethernet in the First Mile Task Force, <http://www.ieee802.org/3/efm/index.html> (data de acesso, fevereiro de 2010).
- [36] 10Gb/s Ethernet Passive Optical Network, <http://ieee802.org/3/av/> (data de acesso, fevereiro de 2010)
- [37] ITU-T Recommendation G.7041, “Generic framing procedure (GFP)”, 2008.
- [38] M. Hajduczenia, H. J. Silva, e P. P. Monteiro, “EPON versus APON and GPON: a detailed performance comparison”, *Journal of Optical Networking*, vol. 5, n. 4, pp. 298-319, abril 2006.
- [39] Ericsson, “Ericsson to demonstrate world's first 10Gbps GPON for IPTV at NXTcomm08 in Las Vegas”, <http://www.ericsson.com/ericsson/press/releases/20080616-1228432.shtml> (data de acesso, fevereiro de 2010).

- [40] M. Abrams, P. C. Becker, Y. Fujimoto, V. O'Byrne, e D. Piehler, "FTTP Deployments in the United States and Japan-Equipment Choices and Service Provider Imperatives", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, n.1 pp. 236, 2005.
- [41] O. Marmur e E. Shraga, "GPON – The Next Big Thing in Optical Access Networks", *Proceedings of the SPIE*, vol. 5282, pp. 199-209, 2004.
- [42] F. Effenberger, et al, "An introduction to PON technologies", *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, pp. 17-25, março 2007.
- [43] V. S. Frost e B. Melamed, "Traffic Modeling for Telecommunication Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 32, pp. 70-80, março 1994.
- [44] W. E. Leland, M. S. Taqqu e D. V. Wilson "On the self-similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version)", *IEEE/ACM Transaction on Networking*, vol. 2, n. 1, pp. 1-15, fevereiro 1994.
- [45] "GPON is more than just a faster PON", Broadlight, pp. 1-6. <http://www.broadlight.com/docs/pdfs/wp-gpon-more-than-faster-pon.pdf> (data de acesso, fevereiro de 2010).
- [46] Cisco, "Approaching the Zettabyte Era", http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-481374_ns827_Networking_Solutions_White_Paper.html (data de acesso, fevereiro de 2010).
- [47] B. Skubic, J. Chen, J. Ahmed, L. Wosinska e B. Mukherjee, "A Comparison of Dynamic Bandwidth Allocation for EPON, GPON, and Next-Generation TDM PON", *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, n. 3, pp. 40-48, março 2009.
- [48] K. Thompson, G. J. Miller e R. Wilder, "Wide-area Internet traffic patterns and characteristics", *IEEE Network*, vol. 11, no. 6, pp. 10-23, dezembro 1997.
- [49] M. E. Crovella e A. Bestavros, "Self-Similarity in World Wide Web Traffic Evidence and Possible Causes", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 5, no. 6, pp. 835-846, maio 1996.