

Alocação dinâmica de largura de banda com predição dos próximos GRANT em redes Long-Reach PON

Madson R. Araujo¹, Alex S. Santos¹, Tamise S. França¹,
Stéfani S. Pires¹, Maycon L. M. Peixoto¹, Ricardo Rios¹, Gustavo B. Figueiredo¹

¹Instituto de Matemática – Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Av. Adhemar de Barros, s/n, Ondina – 40170-115 – Salvador – BA – Brasil

{madsonra, gustavo}@dcc.ufba.br, {santos.alex, ricardoar}@ufba.br
tamise-santos@hotmail.com, stefani.pires@ifba.edu.br, mayconleo@gmail.com

Abstract. *Passive Optical Networks (PON) technology was designed to work as a point-to-multipoint architecture and it has been widely adopted due to its simplicity, low cost and scalability. Typical PON is limited to a range of 20 km, whereas Long Reach Passive Optical Network (LRPON) can connect devices within a distance about 100 km. As the distance increases, it is important to better control the propagation delay of messages sent/received between ONU and OLT. However, there exists situations in which the time spent to control the delay can affect the system overall performance. Aiming at overcoming this drawback, we present a new prediction-based algorithm that models the time intervals used to transmit messages from ONUs to OLT, allowing to forecast when ONUs will start a new transmission and, as a consequence, reducing the number of control messages. Results emphasize the importance of the proposed algorithm and how it outperforms methods widely adopted in the literature.*

Resumo. *As Redes Óticas Passivas (Passive Optical Network – PON) são uma tecnologia promissora, simples, de baixo custo e escalável. Uma PON típica possui um alcance de 20 km, enquanto que PONs de longo alcance conectam dispositivos a uma distância de aproximadamente 100 km. À medida que a distância aumenta, torna-se necessário realizar um melhor controle do atraso de propagação de mensagens enviadas/recebidas entre ONU e OLT. Este trabalho apresenta um algoritmo de predição que modela intervalos de tempos utilizados para transmitir mensagens de ONUs para OLT, permitindo estimar quando ONUs iniciarão uma nova transmissão a fim de reduzir o número de mensagens de controle e, em última instância, o atraso de transmissão. Resultados destacam a importância do algoritmo proposto e como ele supera métodos largamente utilizados na literatura.*

1. Introdução

A crescente oferta de serviços “triple-play” (vídeo, áudio e dados) tem aumentado a necessidade por largura de banda nas redes de acesso, posicionando as Redes Óticas Passivas (do inglês *Passive Optical Networks* – PON) [Lam 2011] como uma tecnologia de destaque. Além disso, operadores estão atualmente focados no desafio de oferecer serviços *quad play*, em que a mobilidade é adicionada aos serviços *triple play*. Neste sentido,

a rede de última milha, aquela do ponto de ligação entre os provedores de acesso e os clientes, precisa oferecer alta capacidade de transmissão, além de ser eficiente e dinâmica.

Devido à sua simplicidade, baixo custo e escalabilidade, as PONs são consideradas uma tecnologia promissora para suportar essa demanda de dados nas redes de acesso. A natureza passiva de seus componentes permite oferecer menor custo por unidade de banda e reduzir o CAPEX (do inglês *Capital Expenditure*) e o OPEX (do inglês *Operational Expenditure*) dos operadores [Kazovsky et al. 2012, Lam 2011]. Porém, apesar de tais benefícios, as PONs tradicionais possuem alcance reduzido, sendo limitadas a uma distância aproximada de 10 a 20 Km, o que restringe sua abrangência e aplicabilidade em muitos cenários.

Para superar essa limitação de alcance das PONs tradicionais, foi proposta a PON de longo alcance (do inglês *Long Reach-PON* – LR-PON), a qual combina a rede metro e a rede de acesso em uma única rede, garantindo assim redução de custos, de componentes e de complexidade de desenvolvimento. Com isso, o alcance das PONs pode chegar a 100 Km [Usmani et al. 2014]. Esse aumento da distância máxima de operação amplia a quantidade de usuários atendidos na rede de acesso.

Entretanto, o aumento do alcance propiciado pelas LR-PONs resulta em um incremento no RTT (do inglês *Round Trip Time*) entre ONU e OLT, o que pode até inviabilizar a utilização das LR-PONs em muitos cenários. Uma das razões para aumento do atraso nas LR-PONs decorre do funcionamento dos algoritmos de DBA (do inglês *Dynamic Bandwidth Assignment*) utilizados na alocação dinâmica de banda [Novak et al. 2013]. Como será discutido na Seção 2, geralmente o processo de reserva de recursos incorre num atraso de, pelo menos, um RTT para que os dados da ONU sejam transmitidos. Consequentemente, quanto maior o tempo de propagação entre ONU e a OLT, maior o atraso sofrido pelas aplicações suportadas pela rede.

Para reduzir o tempo necessário para a transmissão, algumas pesquisas propõem o uso de técnicas de predição do comportamento das OLTs. Assim, se a OLT funciona em ciclos de processamento, pode-se inferir sobre a chegada de novas mensagens de requisição para antecipar o processamento dos pedidos e realizar a devolução das autorizações. Adicionalmente, a OLT pode usar predição para inferir o excesso de dados presentes no *buffer* de transmissão para oferecer uma mensagem de autorização que contemple chegadas de dados posteriores ao envio da requisição [Zhu and Ma 2008]. No entanto, apesar de tais predições serem capazes de causar uma redução no tempo de acesso de todas as ONUs, o impacto no tempo individual de cada ONU é limitado e o escopo da redução é limitado a um ciclo, não se estendendo a múltiplos ciclos futuros.

Este artigo apresenta um novo algoritmo de DBA que utiliza ferramentas de séries temporais para modelar o comportamento de ONUs e prever suas futuras requisições. Em oposição aos trabalhos existentes na literatura, o algoritmo proposto realiza uma predição individualizada do comportamento futuro das ONUs e concede, através do envio antecipado de permissões de acesso, uma sequência de instantes de tempo para transmissão de dados em diversos ciclos futuros. Conforme apresentado nos resultados obtidos, ao realizar tais reservas antecipadas, o algoritmo proposto permite diminuir o número de RTTs, reduzindo, assim, o atraso em ciclos futuros.

As demais seções deste artigo são organizadas da seguinte forma. A Seção 2

apresenta a tecnologia de redes óticas passivas. A Seção 3 descreve a alocação dinâmica de banda. A Seção 4 apresenta o algoritmo proposto. Na seção 5 são apresentados os resultados numéricos obtidos. Por fim, na seção 6 o trabalho é concluído.

2. Redes Óticas Passivas

As redes óticas passivas são caracterizadas por permitirem o compartilhamento de apenas uma fibra ótica entre os assinantes. Utilizam arquitetura de distribuição do tipo ponto-multiponto, podendo atingir distâncias entre 10 e 20 Km. Composta por, OLT (do inglês *Optical Line Terminator*), alocado no CO (do inglês *Central Office*), conectado às ONUs (do inglês *Optical Network Unit*), onde estão os usuários finais, usando um canal de comprimento de onda para *downstream* e outro para *upstream* passando por um único RN (do inglês *Remote Node*) passivo com funções de multiplexação [Sarkar et al. 2007, Harboe and Souza 2013, Lam 2011]. Ao chegar ao RN através de uma fibra de alimentação oriunda do OLT, o sinal ótico é dividido por um *splitter* passivo para fibras individuais, as fibras de distribuição que levarão o sinal até as ONU. A ausência de elementos ativos nesse trajeto, faz com que os equipamentos sejam menos suscetíveis a falhas e mais fáceis de manter [Feng and Ruan 2009, Yuksel et al. 2008].

2.1. PON DE LONGO ALCANCE

A *Long Reach PON* (LRPON) possui a mesma configuração básica de uma PON acrescida da rede metro, como mostra a Figura 1 [Song et al. 2010].

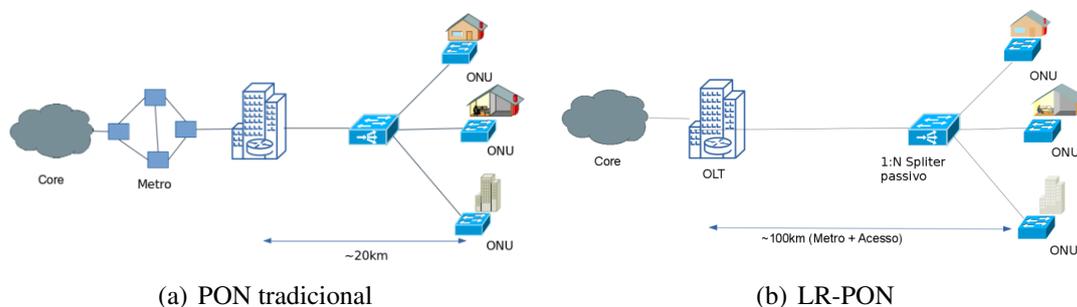


Figura 1. Arquitetura básica da LR-PON

A comunicação entre ONUs e OLTs em uma LR-PON se dá através de um determinado comprimento de onda. Na direção OLT-ONU, tem-se uma conexão do tipo ponto-multiponto e na direção oposta (ONU-OLT) tem-se a conexão multiponto-ponto. Quando a OLT deseja enviar dados para as ONUs, o envio é realizado em *broadcast*. Na direção oposta é necessário a presença de mecanismos que possam orquestrar o envio de informações de forma que não haja interferência entre ONUs [Song et al. 2010].

A principal particularidade das *Long Reach PONs* (LR-PONs) é o aumento da área de cobertura que pode passar dos 20km alcançados em PONs tradicionais chegando a aproximadamente 100km. Para isso, ela explora a utilização de amplificadores óticos, dentre eles o *Erbium-doped fiber amplifier* (EDFA) e o *Semiconductor Optical Amplifier* (SOA), para compensar a perda de energia imposta pelo aumento da área de cobertura, diferentemente de PONs tradicionais que não possuem componentes ativos entre o CO e os usuários finais [Usmani et al. 2014, Song et al. 2010]. Além dos EDFAs e os SOAs,

há também os conversores opto-elétricos (OEO, do inglês *Optical Electrical Optical Converters*), que oferecem extensão de alcance através de regeneração de sinal. Uma desvantagem dos OEO é a sensibilidade à taxas de linha, e dessa forma, não podem permitir múltiplas taxas de linhas coexistentes [Skubic et al. 2010].

Uma LR-PON combina as redes metro e acesso para levar conexão de alta velocidade para as proximidades dos usuários [Song et al. 2010]. Em decorrência de tal junção, o CO passa a ter a função de conectar o núcleo da rede às redes de acesso. Além disso, ele se torna responsável por implementar as funções de *Layer 2* e *Layer 3*, que são a alocação de recurso, agregação, gerenciamento e controle de serviço [Song et al. 2010].

Espera-se que LR-PONs passem a operar a uma taxa de 10 Gb/s e tenham de 2000 a 4000 ONUs [Kiaei et al. 2013]. Dentre as diversas topologias de rede propostas para LR-PON, podemos citar a *branch-and-tree* onde a fibra que compõe a seção de alimentação possui 90 Km (*tree*) e é dividida para múltiplos usuários (*branches*) no *local exchange* que reside na área do usuário. Há também a topologia *ring-and-spur*, onde a seção de alimentação é composta por um anel e os sinais ópticos são adicionados e removidos por *Optical Add-Drop Multiplexers* (OADMs) [Song et al. 2010].

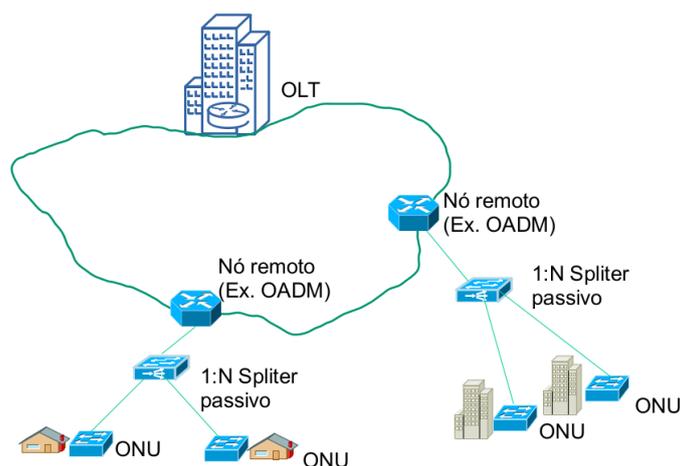


Figura 2. Topologia *ring-and-spur*. Adaptado de [Song et al. 2010]

Algumas implementações de LR-PONs são descritas na literatura. A *PLANET SuperPON* é um projeto desenvolvido pela *Advanced Communication Technologies and Services – Photonic Local Access NETWORK* (ACTS-PLANET), que tem o objetivo de investigar possíveis *upgrades* de sistemas APON G.983 em termos de cobertura, fator de divisão, números de ONUs suportadas e taxas de transmissão. A arquitetura posposta por esse projeto que foi implementada no primeiro trimestre de 2000, suporta um total de 2048 ONUs e possui uma área de cobertura de 100 Km, onde os primeiros 90 Km correspondem à seção de alimentação e os 10 Km restantes à seção de distribuição [Song et al. 2010].

Uma outra implementação de redes LR-PON é a proposta pela *British Telecom*. Essa versão é equipada com *1024-way split*, um alcance de 100 KM e taxa de transmissão de 10-Gbps em ambas as direções (*downstream* e *upstream*). Seu fator de divisão é de 1024, fazendo com que menos amplificadores óticos sejam necessários se comparados com a *PLANET SuperPON* [Song et al. 2010]. O projeto desenvolvido pela *Photonic System Group* da *University College Cork, Irlanda* é composto de uma WDM-TDM LR-

PON híbrida que suporta múltiplos comprimentos de onda. Cada par de comprimento de onda pode suportar uma taxa de divisão de 256 usuários. Além disso, cada segmento de PON possui um alcance de 100 KM.

Tabela 1. Comparação entre implementações de LRPONs. Adaptado de [Song et al. 2010]

Implementação	Tecnologia	Alcance (km)	Comprimento de Onda	N. de ONUs
PLANET SuperPON	APON	100	1	2048
British Telecom	GPON	135	40	2560
Photonic System Group		100	17	4352

Com o aumento da área de cobertura nas LR-PONs, o tempo para troca de mensagens entre ONUs e OLTs sofre um atraso maior, que pode variar de 0.2 ms para 1 ms. Isso faz com que os mecanismos convencionais de alocação de banda se tornem ineficientes. Por isso, novos mecanismos para alocação dinâmica de banda devem ser abordados para superar tais limitações [Usmani et al. 2014].

3. Alocação dinâmica de banda

O uso de algoritmos de DBA proporciona maior eficiência do uso dos recursos por ofertar largura de banda conforme as demandas das ONUs [Hwang et al. 2008]. Eles utilizam o protocolo de controle multiponto, do inglês *Multipoint Control Protocol* (MPCP) para coordenar o acesso das ONUs à fibra compartilhada. Este protocolo define duas mensagens de controle que são usadas no processo de alocação de banda. A primeira delas é a mensagem *Report* e é usada pela ONU para solicitar alocação de banda. A segunda é a mensagem *Gate*, que é usada pela OLT para informar os detalhes da concessão (tempo de transmissão). Quando uma ONU necessita realizar o envio de dados para OLT, ela envia uma mensagem *Report* contendo a quantidade em *bytes* que deseja transmitir, seu *id* e outras informações necessárias. A OLT envia a mensagem *Gate* para as ONUs informando a quantidade de bytes que ela pode transmitir, o *id* da ONU e demais informações necessárias [Song et al. 2009]. A Figura 3 ilustra o funcionamento do processo de reserva de recursos.

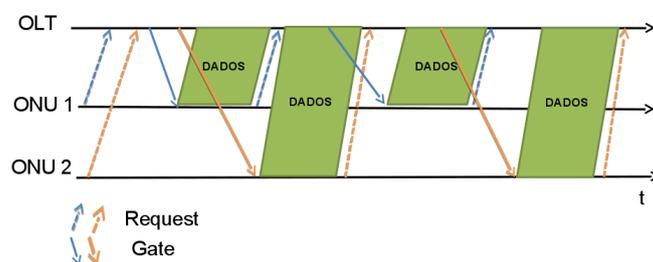


Figura 3. Troca de mensagens no processo de alocação de banda

3.1. Trabalhos relacionados

O IPACT [Kramer et al. 2002] é o algoritmo DBA das PONs tradicionais. Ele é um esquema de DBA centralizado para utilização da largura de banda de forma eficiente. Utiliza

duas mensagens de controle: *Grant* e *Report*. A principal vantagem deste algoritmo é que o tempo do ciclo se adapta de acordo com os dados disponíveis nos *buffers* dos ONUs. Contudo, o IPACT não é adequado para LR-PON [Novak et al. 2013]. Mesmo com baixa carga de dados o desempenho do IPACT é prejudicado devido ao aumento do RTT, que resulta em altas taxas de atraso.

No LSTP proposto em [Luo and Ansari 2005b], a solicitação dos recursos às próximas transmissões é realizada ao final do atual espaço de tempo em uso. A OLT ao receber a requisição com a previsão, aloca o menor valor entre a previsão contida na requisição e a largura máxima de banda determina pelo *Service Level Agreement* (SLA) de cada classe de tráfego. A ONU realiza a previsão das próximas demandas durante o período de espera baseando-se no tráfego que está sendo enfileirado e na classificação do tráfego. O tráfego é classificado com base no DiffServ [Luo and Ansari 2005a].

Em [Dixit et al. 2015], é proposto o *Synergized-Adaptive Multi-GATE polling with Void-filling* (S-AMGAV). Segundo o autor, a principal diferença de sua proposta para as demais existentes na literatura, é que a OLT emite mensagens GATE baseada na ocupação de cada ONU. Assim, a OLT não emite uma mensagem GATE para cada mensagem REPORT recebida.

Em [Zhu and Ma 2008] é proposto o algoritmo *Interleaved Polling With Adaptive Cycle Time with Grant Estimation* (IPACT-GE). Neste algoritmo, a ONU estima a quantidade de dados que chega entre dois *pollings* e com base nesta estimacão a OLT decide o tamanho da transmissão concedida a ONU levando também em consideracão a quantidade da requisiçãõ feita em ciclos anteriores. Para realizar a estimacão, o método proposto se baseia nas características de alto-similaridade da rede. Em [Hwang et al. 2008], o mecanismo Early DBA realiza a prediçãõ conforme uma avaliãõ da variaçãõ histórica do tráfego requisitado por cada ONU. Com base na classificaçãõ do tráfego DiffServ.

Os autores em [Song et al. 2009] propõe o algoritmo *Multi-Thread Polling*. Nesta abordagem, as ONUs não utilizam o ciclo de requisiçãõ, confirmaçãõ e envio de dados. Uma determinada ONU pode realizar requisições seguidas antes de receber mensagens de confirmaçãõ da OLT criando assim a ideia de *thread*.

4. O Algoritmo Proposto

Esta seçãõ apresenta o algoritmo *Predictive-DBA* (PD-DBA), que visa garantir alocaçãõ dinãmica de largura de banda e reduçãõ do atraso na rede com a diminuicãõ de mensagens de requisiçãõ enviadas pelas ONUs. Inicialmente sãõ apresentados os conceitos fundamentais sobre prediçãõ de dados utilizados como base para o desenvolvimento do algoritmo.

4.1. Prediçãõ de Dados com Série Temporal

O algoritmo de DBA proposto neste trabalho analisa o comportamento das fontes ONUs, modelando individualmente o padrãõ de suas requisições de envio de dados para as OLTs. Ao receber uma nova requisiçãõ para início de transmissãõ de dados, a OLT envia para a ONU solicitante o próximo instante livre e uma sequênciã de instantes futuros que podem ser utilizados sem a necessidade de realizar novas requisições. A sequênciã de instantes futuros é estimada por um preditor que modela informações históricas de início e fim de

transmissão de dados de cada ONU, possibilitando uma alocação dinâmica de largura de banda, conforme discutido a seguir.

Seja $\mathcal{D} = \{\mathcal{O}_1, \mathcal{O}_2, \dots, \mathcal{O}_n\}$ um ambiente de rede PON formado por n ONUs, sendo que cada ONU j pode ser definida como $\mathcal{O}_j = \{S_j, E_j\}$, tal que $1 \leq j \leq n$. No contexto deste trabalho, $S_j = \{s_0, s_1, \dots, s_t\}$ e $E_j = \{e_0, e_1, \dots, e_t\}$ representam duas séries temporais contendo, respectivamente, os instantes de início e fim de envio de dados da ONU j para a OLT. Por exemplo, a primeira transmissão da ONU j foi iniciada no instante s_0 e finalizada no instante e_0 . A partir das informações contidas em S_j e E_j , uma função modelagem $f(\cdot)$ pode ser utilizada para prever futuras requisições da ONU j .

Entretanto, devido ao grande volume de requisições realizadas no ambiente formado pelas ONUs e OLTs, a aplicação de técnicas tradicionais de modelagem de séries temporais possui duas grandes limitações. A primeira limitação ocorre porque é impraticável coletar todos os instantes de início e fim de transmissão de cada ONU para execução de um preditor em *batch*. Seria necessário, para isso, uma grande quantidade de memória e um alto custo de processamento. A segunda limitação deve-se à natureza das ONUs que requisitam, de maneira intermitente, novos instantes de transmissão, ou seja, é impossível armazenar previamente todas os instantes de tempo das requisições para realizar uma predição.

Para superar essas limitações, foram definidas duas variáveis: i) τ e ii) l . A primeira variável determina o tamanho de janela que será utilizada para modelar o comportamento dos instantes de início e fim de requisição de transmissão entre ONU e OLT, i.e., a predição utilizará um modelo obtido sobre as janelas $\{s_i, s_{i+1}, \dots, s_{i+\tau}\}$ e $\{e_i, e_{i+1}, \dots, e_{i+\tau}\}$, tal que $0 \leq i \leq t - \tau$. A segunda variável l define o número de observações preditas a partir do modelo obtido. Por exemplo, $f(S_j, \tau, l)$ é utilizada para prever l instantes de início futuros com base em τ observações passadas.

Inicialmente, o preditor utilizado pelo algoritmo de DBA proposto aguarda até que τ requisições sejam realizadas. Durante esse período, cada solicitação de requisição de uma determinada ONU é respondida com um intervalo de início e fim de transmissão, que é determinado pelas políticas de escalonamento definidas nas OLTs. Após o preenchimento da janela, i.e., número de requisições por ONU for maior ou igual a τ , para cada nova requisição de transmissão, é enviado um intervalo definido pelo escalonador e uma sequência l de predições, que podem ser utilizadas pela ONU solicitante em transmissões futuras sem a necessidade de realizar l novas solicitações para a OLT.

O tamanho τ da janela e o número l de predições podem ser ajustados em tempo de execução pela minimização do erro médio quadrático definido pela equação $e = E(\hat{\theta} - \theta)$. Nesta equação, $\hat{\theta}$ representa um conjunto de l instantes iniciais ou finais de transmissão preditos pelo algoritmo. Por outro lado, θ representa os instantes reais nos quais a ONU solicitante desejaria transmitir dados. Esses valores reais são recebidos pelo preditor na mesma mensagem enviada pela ONU para solicitar novos instantes de transmissão, após utilizar todos os instantes enviados na requisição anterior.

É importante destacar que o objetivo do algoritmo de DBA proposto não é encontrar a melhor modelagem e predição dos dados em redes Long-Reach PON, mas analisar como a predição pode reduzir a troca de mensagens entre ONUs e OLTs. Neste trabalho, a função $f(\cdot)$ de predição utilizada como prova de conceito realiza uma regressão linear

sobre os dados vez que a distribuição dos valores de início e fim de transmissão foram produzidos seguindo um modelo independente e identicamente distribuído com média e variância constantes [Hamilton 1994]. Melhores métodos de predição podem ser utilizados dependendo do padrão de trocas de mensagens no ambiente. Por exemplo, abordagens de modelagem de fluxos contínuos de dados para detecção de troca de contexto (*concept drift*) [Gama et al. 2014] podem melhorar a acurácia do preditor detectando, em tempo de execução, alterações de comportamento na transmissão de dados entre ONUs e OLTs.

4.2. Predictive-DBA

O algoritmo PD-DBA (Algoritmo 1) é invocado pelo OLT ao receber uma mensagem *report* de uma ONU_j. Ele recebe como entrada um *report* da ONU_j, o RTT do OLT até a ONU_j, um intervalo de guarda, e a largura de banda. Primeiro, o algoritmo verifica se há predições para a ONU_j. Em caso positivo, um conjunto de *grants* preditas é retornado à ONU_j. Caso contrário, o algoritmo calcula a janela de transmissão para a ONU_j e retorna uma única *grant* padrão contendo o início e fim da janela de transmissão da ONU_j.

Ao receber a *grant*, a ONU_j verifica se essa *grant* é padrão ou contém predições. Se a *grant* for padrão, o ONU_j envia os pacotes armazenados em seu *buffer* até o final da janela de transmissão concedida e em seguida envia um novo *report* informando o tamanho atual de seu *buffer*. Se a *grant* contiver predições, como mostrado na Figura 4, a ONU_j envia os pacotes armazenados no *buffer* até o final da primeira janela predita e em seguida espera até o início da próxima janela predita para transmitir novamente. Enquanto houver predições esse processo será repetido até a última janela predita. Ao final da transmissão da última janela predita, a ONU_j envia para OLT um *report* contendo o tamanho atual do seu *buffer* e um erro (período sem transmissão dentro da janela predita) associado a cada predição.

Entrada: ONU_j report buffer, ONU_j RTT, Intervalo de Guarda, Largura de Banda
Saída: Mensagem *Grant* especificando instantes de transmissão

```

1 início
2   predição,grant = getPredições(ONUj);
3   if predição == True then
4     |   retorna grant;
5   end
6   else
7     |   tempo de envio = ONUj report buffer/Largura de Banda ;
8     |   duração da grant = ONUj RTT + tempo de envio + Intervalo de Guarda;
9     |   início da grant= tempo atual;
10    |   fim da grant= início da grant + duração da grant;
11    |   grant = [início da grant, fim da grant];
12    |   retorna grant;
13  end
14 fim

```

Algoritmo 1: PD-DBA

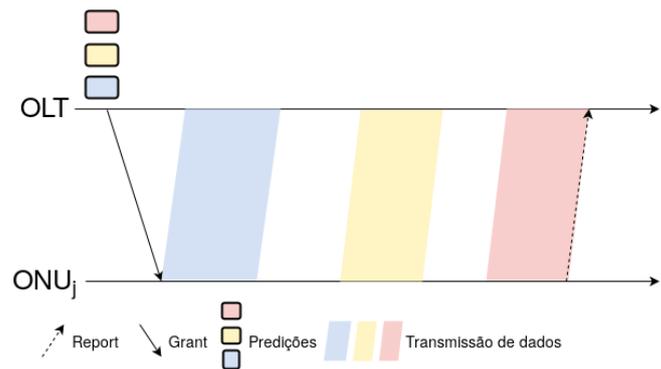


Figura 4. Exemplo do PD-DBA

5. Exemplos Numéricos

Para avaliar o desempenho do algoritmo proposto, foi desenvolvido um simulador *ad-hoc*, implementado em linguagem Python que utiliza a biblioteca Simpy¹. A topologia utilizada na avaliação corresponde àquela apresentada na Figura ??, na qual um conjunto de ONUs compartilha o mesmo canal *upstream* operando sob um mesmo comprimento de onda de 1Gb/s.

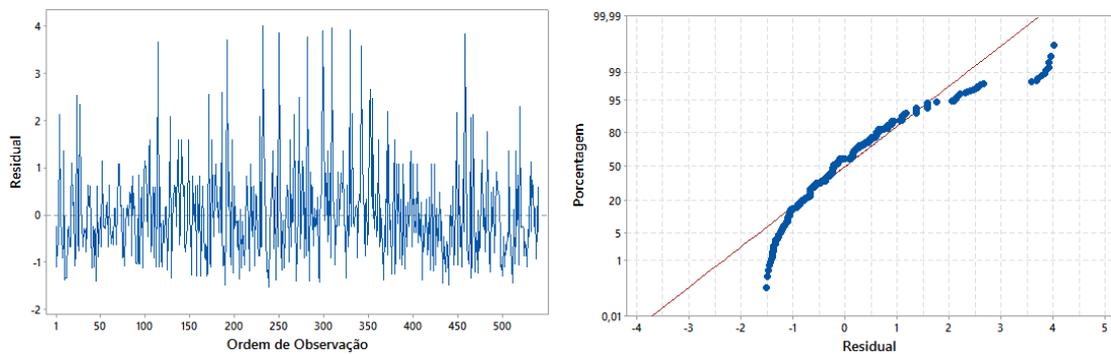
A carga de trabalho na simulação foi planejada usando pacotes (dentro da rede óptica) com tamanho fixo de 9KB (Jumbo Frame) seguindo a distribuição Poisson. Cada ONU possui *buffer* de tamanho ilimitado com *bucket* de 18KB e só pode enviar mensagem de *report* para OLT se a quantidade de dados no seu *buffer* for maior ou igual ao tamanho do *bucket*. O algoritmo proposto (PD-DBA) foi comparado com os algoritmos IPACT [Kramer et al. 2002] e OP-DBA (optimal dynamic bandwidth allocation), e os resultados foram obtidos operando sem limite de tamanho máximo de *grant*. O algoritmo OP-DBA utiliza como entrada um conjunto de *grants* alocados durante uma determinada execução IPACT e retorna esse conjunto de *grants* na forma de predições para as ONUs. Desse modo, o OP-DBA realiza uma predição perfeita das *grants* alocadas pelo IPACT. O objetivo do OP-DBA nesse trabalho é ser uma referência de predição que resulte em menor atraso, ou seja, uma referência representando o melhor caso para comparação com os demais algoritmos da mesma natureza.

Seguindo as orientações de [Jain 1991, Sanches and Wan 2015], os experimentos foram conduzidos utilizando o modelo de planejamento de experimentos fatorial completo. O projeto de experimentos desenvolvido neste trabalho considera os seguintes fatores que influenciam no desempenho do sistema: [Fator **A** - Algoritmo]= {IPACT, PD-DBA, OP-DBA}; [Fator **B** - Quantidade ONUs]={30, 60, 90}; [Fator **C** - Carga]={37%, 74% 99%}; [Fator **D** - Distância]= {20km, 100km}. Os fatores e níveis do sistema foram definidos através de valores mais prováveis e utilizados na literatura, permitindo avaliar a completude do efeito que essas variáveis provocam ao ambiente. Todos os experimentos foram analisados a partir do intervalo de confiança², da média e do desvio padrão aferidos. Esses parâmetros são utilizados como base para o cálculo da soma dos quadrados, resultando na influência de cada fator nas variáveis de resposta.

¹<https://simpy.readthedocs.io/en/latest/index.html>

²Utilização da distribuição *t-student* com replicações de 10 execuções por experimento e $\alpha = 0,05\%$.

Para validar os dados observados, a Figura 5(a) e a Figura 5(b) representam a ordem de execução dos experimentos e a distribuição residual observada nos resultados, respectivamente. Como pode ser observado na Figura 5(a), a qual apresenta os resíduos na ordem das observações correspondentes, a ordem das observações não influenciou os resultados, indicando que os experimentos não seguem uma ordem temporal. Este gráfico é útil, ainda, para demonstrar que há variação em relação às amostras, permitindo dizer que os resultados não são tendenciosos. Além disso, a Figura 5(b) apresenta a observação da normalidade na execução dos experimentos. O esperado é que os pontos do gráfico, relacionados aos experimentos, residam sobre ou próximos à linha normal, como é observado na Figura 5(b).

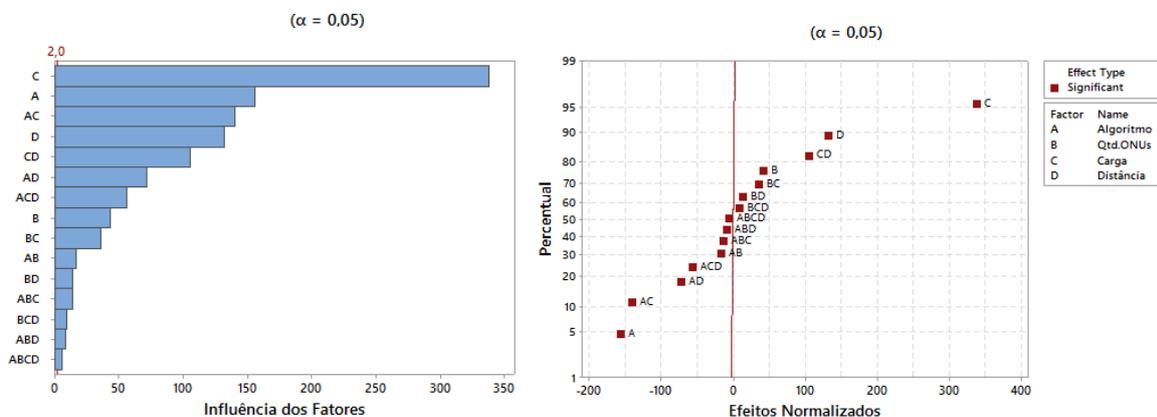


(a) Distribuição das Execuções

(b) Observação da Normalidade na Execução dos Experimentos

Figura 5. Validação das Observações dos Experimentos

A Figura 6(a) mostra o gráfico pareto dos efeitos para o projeto fatorial 2^k com combinação dos algoritmos OP-DBA e IPACT. Esse gráfico é utilizado para mostrar o grau de influência que os fatores exercem sobre a variável de resposta Atraso. Nota-se que o valor absoluto dos efeitos estão após a linha vermelha, indicando que todos os fatores escolhidos apresentam importância para o ambiente. Os efeitos mais significativos são a Carga (Fator C) seguido do Algoritmo (Fator A). Isso significa que mudanças nos níveis de carga e de algoritmo produzem uma alteração significativa na variável de resposta (Atraso).



(a) Influências dos Fatores

(b) Influência dos Fatores normalizada

Figura 6. Projeto Fatorial

Ainda lidando com a questão da influência dos fatores, a Figura 6(b) acrescenta mais informações com relação a esses efeitos observados. À medida que o fator C dirige-se à direita da linha vermelha normalizada, ocorre o acréscimo no valor obtido da variável de resposta. Por outro lado, à medida que o fator A se encontra à esquerda da linha normalizada, sugere-se uma diminuição do valor agregado obtido pela variável de resposta. Dessa forma, quando o cenário se encontra sobrecarregado, uma solução viável é tratar o Fator A (Algoritmo), pois esse fator é o responsável por produzir melhores resultados para a variável de resposta.

Dentro do conjunto de gráficos que a Figura 7 apresenta, existem informações com relação às interações entre os fatores dos experimentos. Apesar das retas estarem paralelas, não indicando interações significantes, nota-se que à medida que a carga agregada do ambiente (Qty.ONUs, Carga e Distância) aumenta, existe uma inclinação das linhas em favor dos algoritmos PD-DBA e OP-DBA. Apesar de não possuir resultados ótimos como o algoritmo OP-DBA, o algoritmo PD-DBA consegue melhorar seu desempenho quando os níveis de carga agregada aumentam.

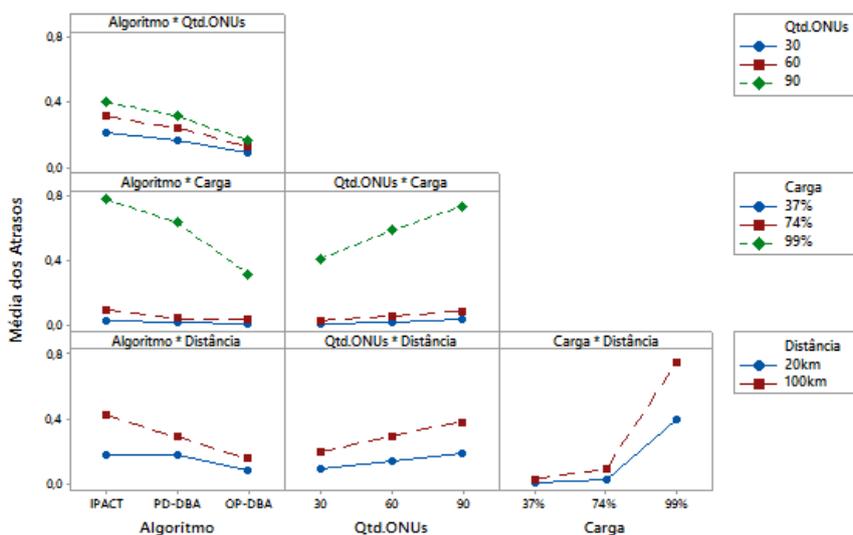


Figura 7. Interações entre os Fatores

A Figura 8 apresenta um gráfico análogo para ANOVA, testando a igualdade de médias da população por meio de uma aproximação normal com dados binomiais e de Poisson. Este gráfico é importante para testar a hipótese de que cada média de todas as combinações de fator/nível é igual à média geral de um nível especificado. Entretanto, o gráfico de Efeitos das Interações mostra que o algoritmo IPACT combinado com a distância 100 km rejeita a hipótese de que sua média é igual a média total, pois esse algoritmo utilizado para a rede de 100 km apresenta a valor de média superiores a média total do experimento. De fato, o gráfico de Principais Efeitos do Fator Algoritmo indica que o algoritmo IPACT supera o limite superior com referência a média total e o algoritmo OP-DBA supera o limite inferior com referência a mesma linha verde que possui a média de 0, 2229. O mesmo padrão se repete para a comparação das distâncias, mostrando que as médias das amostras estão fora dos limites de decisão na variação de 20 km para 100 km.

Um resumo dos efeitos dos fatores avaliados neste trabalho é apresentado na Fi-

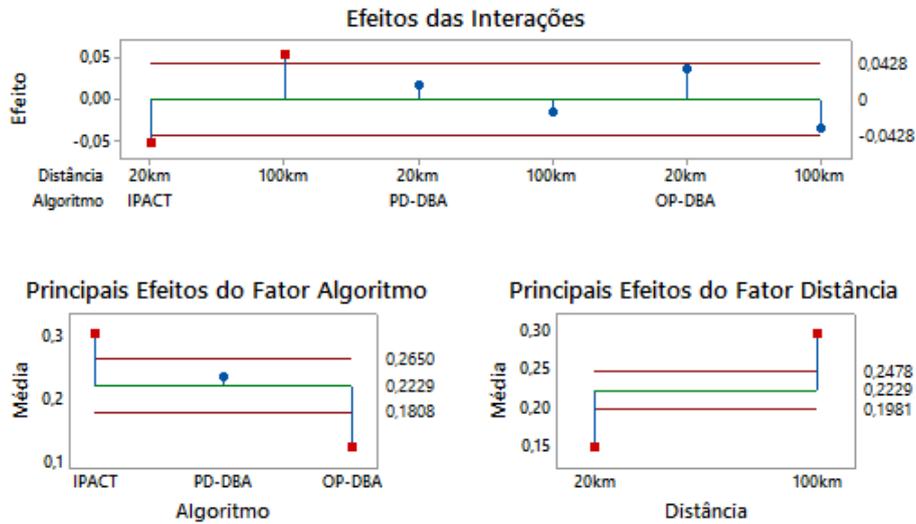
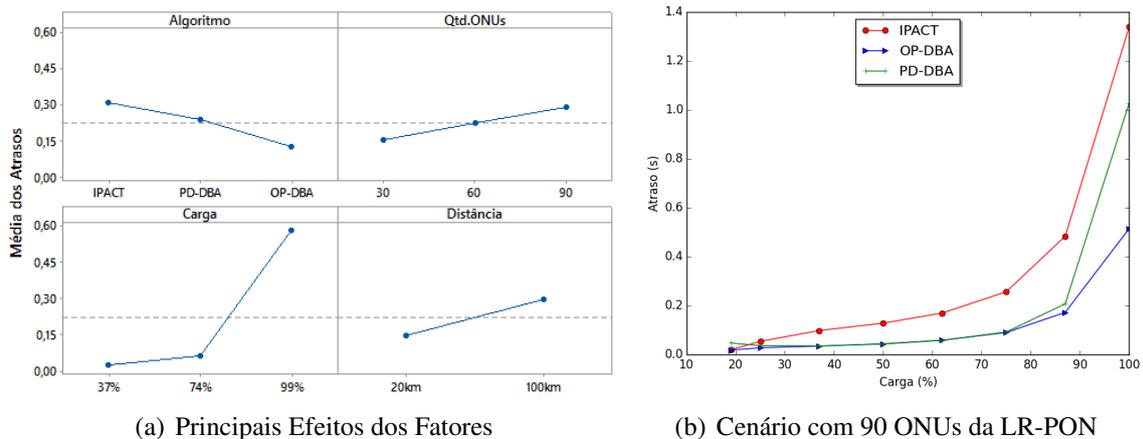


Figura 8. Two-Way (ANOVA)

gura 9(a). Em comparação com o IPACT, o algoritmo proposto neste trabalho (PD-DBA) conseguiu, por meio de suas previsões, minimizar a média dos atrasos, mesmo em cenários de sobrecarga. Já a Figura 9(b) apresenta o comportamento dos algoritmos em função das diversas cargas impostas. De acordo com os cenários experimentados, o PD-DBA demonstrou ser capaz de gerenciar melhor as trocas de mensagens entre ONU e OLT na rede LR-PON do que o IPACT, causando menor atraso de propagação entre o tempo de viagem dos dados. Além disso, o PD-DBA apresentou atrasos médios próximos ao algoritmo de referência OP-DBA. Apesar do crescimento severo de tempo de atraso do PD-DBA na variação de taxa [87%-99%] de carga, ele permanece com tempos menores que o IPACT. Essa situação ocorre por causa da limitação do PD-DBA em gerar previsões em função do aumento do número de requisições. Assim, nessa circunstância de tráfego elevado, o PD-DBA atua na forma convencional do IPACT.



(a) Principais Efeitos dos Fatores

(b) Cenário com 90 ONUs da LR-PON

Figura 9. Comparação entre os principais efeitos

6. Conclusão

A LR-PON (*Long Reach* - PON) foi criada para superar as limitações de alcance das PONs tradicionais. Com o aumento do alcance da PON, ocorre também o aumento nos atrasos

de propagação das informações, surgindo a necessidade de otimizar o controle de troca de mensagem entre ONU e OLT. A hipótese adotada neste trabalho foi que a utilização de preditores baseados em séries temporais poderiam minimizar as trocas de mensagens entre a ONU e a OLT. Desse modo, foi proposto o algoritmo PD-DBA - (Predictive - DBA), um algoritmo baseado em predição que utiliza séries temporais para estimar a quantidade de dados que uma determinada ONU necessitará.

Simulações do algoritmo proposto (PD-DBA) mostraram que as predições podem minimizar a média dos atrasos, mesmo em função de cenários sobrecarregados, ou seja, mesmo quando a carga era de 99% com 90 ONUs solicitando requisições de GRANT simultaneamente. Os resultados também mostraram que o PD-DBA supera os valores conseguidos pelo IPACT em quase 26% na média, considerando todos os cenários dos experimentos utilizados. Além disso, o PD-DBA mantém-se próximo dos resultados obtidos pelo algoritmo de referência OP-DBA. Como trabalhos futuros, pretende-se refinar o algoritmo PD-DBA para aumentar a janela de predições, minimizando mais o atraso das requisições da ONU para novos GRANTs.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, CNPq e FAPESB (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia) pelo apoio recebido para o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- Dixit, A., Lannoo, B., Colle, D., Pickavet, M., and Demeester, P. (2015). Synergized-adaptive multi-gate polling with void filling: Overcoming performance degradation in lr-pops. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 7(9):837–850.
- Feng, T. and Ruan, L. (2009). Design of survivable hybrid wireless-optical broadband-access network. In *2009 IEEE International Conference on Communications*, pages 1–5.
- Gama, J. a., Žliobaitė, I., Bifet, A., Pechenizkiy, M., and Bouchachia, A. (2014). A survey on concept drift adaptation. *ACM Comput. Surv.*, 46(4):44:1–44:37.
- Hamilton, J. D. (1994). *Time Series Analysis*. Princeton University Press.
- Harboe, P. B. and Souza, J. R. (2013). Passive optical network: Characteristics, deployment, and perspectives. *IEEE Latin America Transactions*, 11(4):995–1000.
- Hwang, I.-S., Shyu, Z.-D., Ke, L.-Y., and Chang, C.-C. (2008). A novel early dba mechanism with prediction-based fair excessive bandwidth allocation scheme in epon. *Computer Communications*, 31(9):1814–1823.
- Jain, R. (1991). *The Art of Computer Systems Performance Analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling*. Wiley.
- Kazovsky, L., Wong, S.-W., Ayhan, T., Albeyoglu, K. M., Ribeiro, M. R., and Shastri, A. (2012). Hybrid optical–wireless access networks. *Proceedings of the IEEE*, 100(5):1197–1225.
- Kiaei, M., Fouli, K., Scheutzow, M., Maier, M., Reisslein, M., and Assi, C. (2013). Low-latency polling schemes for long-reach passive optical networks. *IEEE Transactions on Communications*, 61(7):2936–2945.

- Kramer, G., Mukherjee, B., and Pesavento, G. (2002). Interleaved polling with adaptive cycle time (ipact): A dynamic bandwidth distribution scheme in an optical access network. *Photonic Network Communications*, 4(1):89–107.
- Lam, C. F. (2011). *Passive optical networks: principles and practice*. Academic Press.
- Luo, Y. and Ansari, N. (2005a). Dynamic upstream bandwidth allocation over ethernet pons. In *IEEE International Conference on Communications, 2005. ICC 2005. 2005*, volume 3, pages 1853–1857 Vol. 3.
- Luo, Y. and Ansari, N. (2005b). Limited sharing with traffic prediction for dynamic bandwidth allocation and qos provisioning over ethernet passive optical networks. *Journal of Optical Networking*, 4(9):561–572.
- Novak, T., Pilinsky, S. Z., and Draganić, M. (2013). Performance of dynamic bandwidth allocation algorithms in passive optical networks. In *Proceedings ELMAR-2013*, pages 157–160.
- Sanches, M. and Wan, H. (2015). Work smarter, not harder: A tutorial on designing and conducting simulation experiments. *Winter Simulation Conference*.
- Sarkar, S., Dixit, S., and Mukherjee, B. (2007). Hybrid wireless-optical broadband-access network (woban): A review of relevant challenges. *Journal of Lightwave Technology*, 25(11):3329–3340.
- Skubic, B., Chen, J., Ahmed, J., Chen, B., Wosinska, L., and Mukherjee, B. (2010). Dynamic bandwidth allocation for long-reach pon: overcoming performance degradation. *IEEE Communications Magazine*, 48(11):100–108.
- Song, H., Kim, B. W., and Mukherjee, B. (2009). Multi-thread polling: a dynamic bandwidth distribution scheme in long-reach pon. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 27(2):134–142.
- Song, H., Kim, B. W., and Mukherjee, B. (2010). Long-reach optical access networks: A survey of research challenges, demonstrations, and bandwidth assignment mechanisms. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 12(1):112–123.
- Usmani, F., Zaidi, S. M. H., Awais, A., and Raja, M. Y. A. (2014). Efficient dynamic bandwidth allocation schemes in long-reach passive optical networks- a survey. In *2014 11th Annual High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies (Photonics for Energy)*, pages 36–40.
- Yuksel, K., Moeyaert, V., Wuilpart, M., and Mégret, P. (2008). Optical layer monitoring in passive optical networks (pons): A review. In *Proceedings of 10th Anniversary International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2008), Athens, Greece*, pages 92–98.
- Zhu, Y. and Ma, M. (2008). Ipact with grant estimation (ipact-ge) scheme for ethernet passive optical networks. *J. Lightwave Technol.*, 26(14):2055–2063.