

Comportamento do Espectro Óptico em Redes Ópticas Elásticas em um Duopólio de Telecomunicações

Victor P. Sousa¹, Rodrigo C. Bortoletto²

^{1,2} Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP)
07115-000 – Guarulhos – SP – Brazil.

victor.sousa@aluno.ifsp.edu.br, bortoletto@ifsp.edu.br

Abstract. *The demand for bandwidth grows exponentially year after year, due to the increase in the number of users. Thus, there is an urgent need to modernize this infrastructure of access providers, which increasingly provide bandwidth for users. The use of new technologies based on Elastic Optical Networks, is essential to feed the growing demand for bandwidth. This work aims to study a duopoly model using the new models of these networks, and to understand their application through the development of a simulator that allows studying the blocking probability in Elastic Optical Networks.*

Keywords: *Markov chain, Telecommunications, Simulation, Duopoly.*

Resumo. *A demanda por largura de banda cresce exponencialmente ano após ano, em virtude do aumento do número de usuários. Desta forma, surge a necessidade premente de modernização da infraestrutura dos provedores de acesso, que oferecem cada vez mais largura de banda para os usuários. O uso de novas tecnologias baseadas em Redes Ópticas Elásticas, torna-se fundamental para alimentar a crescente demanda por largura de banda. Este trabalho tem o objetivo de estudar um modelo de duopólio usando os novos modelos dessas redes e compreender sua aplicação por meio do desenvolvimento de um simulador que permita estudar a probabilidade de bloqueio em Redes Ópticas Elásticas.*

Palavras-chave: *Cadeia de Markov, Telecomunicações, Simulação, Duopólio.*

1. Introdução

As atuais redes de grade fixa são formadas por múltiplas portadoras ópticas espaçadas igualmente em frequência, formando uma grade padrão definida pela recomendação G.694.1 da ITU (International Telecommunication Union), cujo espaçamento corresponde à única granularidade disponível para acomodar as necessidades atuais de tráfego da rede (RECOMMENDATION, 2012).

As portadoras das redes de grade fixa eram inicialmente espaçadas em frequência a cada 200 GHz, que corresponde aproximadamente 1,6 nm, permitindo o transporte de até 20 canais. Contudo, para enfrentar o crescente aumento de tráfego na última década (NETWORKING INDEX, 2016), uma série de inovações aumentaram a capacidade de transporte das redes de grade fixa. O espaçamento entre bandas passou a ser de 50 GHz, (cerca de 0,4 nm), que permitiu o transporte de até 80 canais, fornecendo assim 800 Gb/s por enlace, o que seria insuficiente para operadoras que necessitam de enlaces de alta velocidade

no núcleo de suas redes (backbone). Além disso, a capacidade dos canais foi ampliada por meio da utilização de dispositivos opto eletrônicos com maior capacidade de detecção de bits, passando a operar de 2,5 Gb/s para até 100 Gb/s, gerando uma eficiência espectral de 2 bits/s/Hz (LÓPEZ; VELASCO, 2016).

Uma consequência do uso da grade fixa em redes ópticas corresponde ao desperdício de banda devido a alocação de um comprimento de onda para conexões com baixa taxa de transmissão. Neste caso, a grade que acomodaria uma conexão com uma taxa de transmissão maior é desperdiçada devido à necessidade de acomodação desta requisição (JINNO et al., 2011; CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2011a).

Em um futuro próximo, o limite de capacidade dessas redes será atingido, e os problemas presentes nas redes de grade fixa serão um impedimento para manter a velocidade de crescimento dos sistemas de transmissão, sendo necessária uma nova tecnologia que permita maior elasticidade e dinamicidade para as redes ópticas (KLEKAMP et al., 2010).

As redes ópticas com grade de espectro flexível conciliam escalabilidade e flexibilidade na medida em que apresentam menor desperdício de banda para as demandas que apresentam baixa taxa de transmissão, além de acomodar demandas por altas taxas de transmissão, e economizar a banda de guarda que seria desperdiçada caso essa mesma taxa de transmissão fosse dividida em uma rede óptica com grade fixa (JINNO et al., 2011; CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2011a).

O espectro das fibras ópticas pode ser usado de forma mais flexível, pois isso pode ser obtido por meio do uso de grades com menor espaçamento, em torno de 6,25 a 12,5 GHz, e pela possibilidade de concatenação permitindo o uso de porções contíguas do espectro óptico.

A implantação de taxas de transmissão de dados maiores deve agravar o problema do uso inadequado do espectro, devido a necessidade de maior diversidade na granularidade dos serviços (JINNO; TAKARA; KOZICKI, 2009; JINNO et al., 2011). Portanto, para atender às necessidades da internet do futuro, as tecnologias de transmissão e provisionamento de recursos das redes ópticas avançam na direção de sistemas de baixo custo por bit, mais eficientes na utilização do espectro disponível, devendo para isso serem mais flexíveis e escaláveis (TALEBI et al., 2014; SATO; HASEGAWA, 2009).

Nas redes flexíveis, o espectro do sinal trafegado pela fibra é fatiado em diversos intervalos pequenos e contíguos conhecidos como slots, que modulam subportadoras contíguas e ortogonais com suas vizinhas de tal forma que anulam a interferência entre sinais espectrais contíguos. Assim, essas redes apresentam vantagens como a redução da interferência Inter simbólica; melhor eficiência espectral, pois as modulações das subportadoras podem sobrepor-se no espectro devido à sua ortogonalidade; e o suporte a

múltiplas taxas de dados por meio do agrupamento de número variável de subportadoras, tornando-se possível dar suporte a taxas de dados de Gbps até Tbps (ZHANG, et al., 2013).

As redes ópticas elásticas são capazes de suportar demanda por taxas de bit mais elevadas de forma mais eficiente (GERSTEL et al., 2012). Maior flexibilidade de alocação de espectro para demandas heterogêneas, devido ao uso de múltiplas subportadoras e agregação de unidades de espectro, também conhecidos como slots.

O trabalho tem o objetivo de estudar a probabilidade de ocupação de slots do espectro óptico disponibilizado por duas operadoras de telecomunicações, ou seja, um duopólio, que disputam solicitações de requisições de usuários que buscam maximizar seu uso da rede mediante a minimização de sua probabilidade de bloqueio. Para o desenvolvimento do trabalho foi realizada uma modelagem analítica utilizando-se de cadeias de Markov de Tempo Discreto que tem como intuito representar o comportamento do sistema em uma Rede Óptica Elástica em um enlace avulso.

O trabalho é desenvolvido da seguinte forma: A Seção 2 apresenta-se a modelagem do enlace avulso utilizando cadeias de Markov de Tempo Discreto. A Seção 3 apresenta os resultados analíticos de probabilidade de bloqueio obtidos na modelagem para duas operadoras com diferentes quantidades de slots disponíveis. Finalmente, na Seção 4 temos as conclusões do trabalho.

2. Materiais e Métodos

Nessa seção, discute-se um cenário com duas operadoras provendo slots para um grande conjunto de usuários em um enlace único. Cada usuário do enlace único gera um tráfego muito pequeno, de modo que o tráfego gerado para os canais pode ser tratado como uma variável contínua. Em um dado momento, cada usuário enviara inicialmente sua requisição para sua operadora primária. Se esta requisição for bloqueada por esta operadora, o usuário tentará conexão com a operadora secundária, no caso a operadora concorrente.

Assumindo um dado comportamento de troca de operadora pelo usuário, queremos obter o equilíbrio da divisão do tráfego total entre duas operadoras, dado um determinado número de slots W_1 e W_2 disponibilizados pelas operadoras 1 e 2, respectivamente. Estudaremos nesse modelo a probabilidade de bloqueio de banda e a ocupação gerada pelos slots disponibilizados.

Admitindo que as chegadas das requisições obedecem a uma distribuição Poissoniana, o modelo de duopólio pode ser representado por um sistema de Markov em tempo contínuo, como pode ser observado na Figura 4.1 para $(W_1; W_2) = (3,2)$, abaixo.

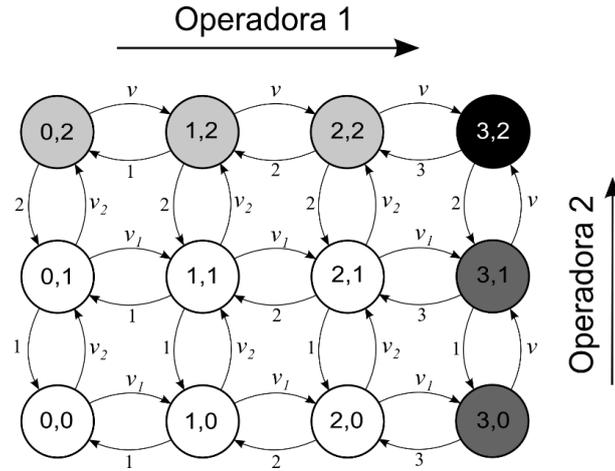


Figura 1. Representação do modelo de Duopólio.

O sistema está no estado (i, j) , com $0 \leq i \leq W_1$ e $0 \leq j \leq W_2$, quando a operadora 1 tiver i canais ocupados e a operadora 2 tiver j canais ocupados. Portanto, o número total de estados será $(W_1 + 1)(W_2 + 1)$. Assume-se que v_1 e v_2 são dados, e sua soma é dada por $v = v_1 + v_2$.

As alterações de estado somente podem ocorrer de um estado para seu estado mais próximo por meio de deslocamentos verticais e horizontais no diagrama de estados. Assim, dado um estado (i, j) qualquer, temos:

- No deslocamento vertical, a variável de estado j pode mudar para $(j + 1)$ ou para $(j - 1)$ se $0 < j < W_2$; ou para 1 se $j = 0$; ou para o estado $W_2 - 1$ se $j = W_2$;
- No deslocamento horizontal a variável de estado i pode mudar para $(i + 1)$ ou para $(i - 1)$ se $0 < i < W_1$; ou para 1 se $i = 0$; ou para $W_1 - 1$ se $i = W_1$;

Na simulação do duopólio a modelagem é realizada respeitando o modelo matemático estudado acima, onde as requisições geradas pelos usuários são direcionadas pela simulação para uma das duas operadoras.

A probabilidade de bloqueio das operadoras 1 e 2 serão dadas por:

$$P_{op1} = P_{3,0} + P_{3,1} + P_{3,2} \tag{1}$$

$$P_{op2} = P_{0,2} + P_{1,2} + P_{2,2} + P_{3,2} \tag{2}$$

O desenvolvimento de um simulador para a modelagem em linguagem computacional foi essencial na busca por resultados conclusivos. O algoritmo conjunto com as fórmulas de Markov, cadeias e matrizes de transição, foram a raiz para a análise do tempo de ocupação dos *slots* no espectro de enlace em redes ópticas elásticas.

Os autores utilizaram as linguagens de programação C para a implementação deste modelo matemático que busca prever e comparar os estados futuros para duas empresas do ramo de telecomunicações, em busca da política ótima, que é a ocupação mais rápida dos *slots* do enlace.

3. Resultados

Na figura 2 abaixo é possível observar a probabilidade de bloqueio da Operadora 1 com 2 slots disponíveis e da Operadora 2 com 3 slots disponíveis.

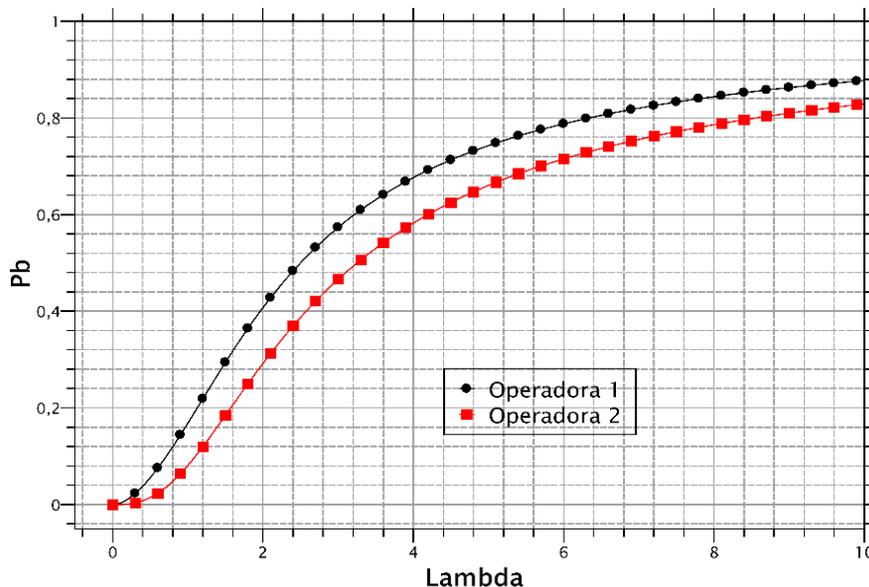


Figura 2. Probabilidade de bloqueio das Operadoras 1 e 2 ($W_1; W_2$) = (3,2).

Em função da quantidade de slots disponibilizados para cada uma das Operadoras podemos observar que a operadora com menos slots obteve uma probabilidade de bloqueio menor, neste caso a Operadora 2.

4. Discussão

A crescente demanda por serviços de qualidade exige um estudo mais aprofundado sobre o comportamento dos usuários e do espectro óptico. Esta análise relatada neste trabalho é uma hipótese inicial sobre o que pode, e deve, ser acrescentado no mundo de telecomunicações.

Resultados em formato gráfico comprovaram que o simulador têm um uso realmente funcional e, a lógica matemática por trás dele está muito bem fundamentada.

O uso deste programa pode prever grandes ganhos a longo prazo, ou também dependendo da sua política específica, recompensas imediatas. Evita perdas em investimentos de *Capex* e *Opex*, economia de *sunk cost*. O estudo da probabilidade de bloqueio capacita a previsão da conduta dos usuários e a demanda de serviços, com isso é possível estabelecer uma quantidade pré-definida de *slots* disponíveis em um estado de tempo específico, gerando uma fluidez contínua na rota dos dados. As informações obtidas podem ser melhoradas e adaptadas para diferentes cenários como monopólio e oligopólio.

5. Conclusão

É possível observar que a quantidade de slots disponibilizados para as conexões pode gerar decréscimo na probabilidade de bloqueio das operadoras, mesmo as Operadoras

permitindo que os usuários possam sair de uma Operadora para outra livremente, sem acréscimo de multa ou políticas de fidelidade.

Nossos estudos trarão acréscimos no trabalho levando ao estudo de custos de novos entrantes no mercado e diferenças de políticas de preços que permitam um melhor entendimento da liberdade de acesso por parte dos usuários.

Agradecimentos

Os autores agradecem os suportes do projeto da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) Proc. 2015/24341-7, bem como ao Programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica do IFSP (PIBIFSP) pela concessão de bolsa de estudo que possibilitou o desenvolvimento do projeto que originou o presente artigo e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Campus Guarulhos pelo apoio e incentivo.

Referências Bibliográficas

CHRISTODOULOPOULOS, K.; TOMKOS, I.; VARVARIGOS, E. A. Elastic Bandwidth Allocation in Flexible OFDM-Based Optical Networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 29, n. 9, p. 1354–1366. doi: 10.1109/JLT.2011.2125777, 2011a.

ESSIAMBRE, René-Jean et al. Capacity limits of optical fiber networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 28, n. 4, p. 662-701, 2010.

GERSTEL, Ori et al. Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer?. *IEEE Communications Magazine*, v. 50, n. 2, 2012.

JINNO, M.; TAKARA, H.; KOZICKI, B. Dynamic optical mesh networks: drivers, challenges and solutions for the future. In: *Optical Communication, 2009. ECOC '09. 35th European Conference on. IEEE, 2009. p Offline Modulation Based Spectrum Allocation. 1-4.*

JINNO, Masahiko et al. Elastic and adaptive optical networks: possible adoption Elastic spectrum allocation for time-varying traffic in flexgrid optical networks scenarios and future standardization aspects. *IEEE Communications Magazine*, v. 49, n. 10, 2011.

KLEKAMP, Axel et al. Transparent WDM network with bitrate tunable optical OFDM transponders. In: *National Fiber Optic Engineers Conference. Optical Society of America, 2010. p. NTuB5.*

LÓPEZ, Víctor; VELASCO, Luis (Ed.). *Elastic Optical Networks: Architectures, Technologies, and Control.* Springer, 2016.

MACEDO, N. D. D. *Iniciação à pesquisa bibliográfica.* 2 ed. ed. [S.l.]: Unimarco Editora, 1994.

MUKHERJEE, B. *Optical WDM Networks.* 2006 edition ed. New York: Springer, 2006.

NETWORKING INDEX, Cisco Visual. *Forecast and methodology, 2016-2021, white paper.* San Jose, CA, USA, 2016.

RAMASWAMI, Rajiv; SIVARAJAN, Kumar; SASAKI, Galen. *Optical networks: a practical perspective.* Morgan Kaufmann, 2009.

RECOMMENDATION, G. 694.1: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. International Telecommunications Union, Tech. Rep, 2012.

SATO, Ken-ichi; HASEGAWA, Hiroshi. Optical networking technologies that will create future bandwidth-abundant networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 1, n. 2, p. A81-A93, 2009.

SHEN, G.; ZUKERMAN, M. Spectrum-efficient and agile CO-OFDM optical transport networks: architecture, design, and operation. *IEEE Communications Magazine*, v. 50, n. 5, p. 82–89. doi: 10.1109/MCOM.2012.6194386, 2012.

TALEBI, Sahar et al. Spectrum management techniques for elastic optical networks: A survey. *Optical Switching and Networking*, v. 13, p. 34-48, 2014.

WALDMAN, Helio; ALMEIDA, Raul C.; BORTOLETTO, Rodrigo C. Performance Gains Imparted by Traffic-Awareness in an Elastic Single Link. In: 2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). IEEE, 2020. p. 1-5.

WALDMAN, Helio; ALMEIDA, Raul C.; BORTOLETTO, Rodrigo C. Spectral Idleness Minimization in the Elastic Single Link under Incremental Traffic. In: 2019 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM). IEEE, 2019. p. 1-6.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J.. *Introduction to Operations Research*. 10. ed. Stanford: Mcgraw Hill Education, 2015. 1050 p. (908-922).