

15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

Análise Comparativa da Eficiência de Transmissão em Redes Ópticas Elásticas

Gabriel Oliveira Barbosa¹, Guilherme do Vale de Sousa², Rodrigo Campos Bortoletto³

¹Graduando em Engenharia de Controle e Automação, Bolsista CNPq, IFSP, Campus Guarulhos, oliveira.barbosa@aluno.ifsp.edu.br.

²Graduando em Engenharia da Computação, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Campus Guarulhos, guilherme.vale@aluno.ifsp.edu.br.

³Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Guarulhos, bortoletto@ifsp.edu.br.
Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.06.00-5 Telecomunicações

RESUMO: O tráfego virtual crescente exige tecnologias de transmissão de dados mais eficientes, como as fibras ópticas elásticas. Este estudo compara a eficiência de duas topologias de rede para determinar a mais adequada para a implementação dessas fibras: a rede Pan-Europeia e a rede Ipê. A hipótese inicial é que a rede Pan-Europeia, por ser mais compacta e menos dispersa geograficamente, é mais eficiente. O estudo utiliza simulação em Python com validação do simulador por meio do modelo matemático de Erlang-B, comparando os resultados da simulação com o modelo. A escolha das redes se deve à representatividade da Ipê no cenário nacional brasileiro e à característica metropolitana da rede Pan-Europeia. A pesquisa contribui para o desenvolvimento das telecomunicações e das redes ópticas elásticas ao analisar a eficiência de diferentes topologias de rede. Isso auxilia na escolha de modelos mais adequados para lidar com o tráfego intenso e gerenciar o espectro de frequências de forma eficiente. A escolha da rede Pan-Europeia e da rede Ipê justifica-se pela diferença de estrutura e dispersão geográfica, permitindo analisar o impacto dessas características na eficiência da transmissão de dados. O estudo tem por objetivo determinar qual topologia, entre a Pan-Europeia e a Ipê, é mais eficiente para implementar fibras ópticas elásticas, considerando cenários de tráfego intenso e a necessidade de gestão eficiente do espectro de frequências. A hipótese inicial confirmou-se, a rede Pan-Europeia apresentou menor taxa de bloqueio. A rede Ipê, mesmo com aumento de *slots*, ainda se mostrou menos eficiente.

PALAVRAS-CHAVE: Redes ópticas Elásticas, Enlace Avulso; Simulação; Atribuição de Espectro.

Comparative Analysis of Transmission Efficiency in Elastic Optical Networks

ABSTRACT: Increasing virtual traffic demands more efficient data transmission technologies, such as elastic optical fibers. This study compares the efficiency of two network topologies to determine the most suitable for implementing these fibers: the Pan-European network and the Ipê network. The initial hypothesis is that the Pan-European network, being more compact and less geographically dispersed, is more efficient. The study uses Python simulation with validation of the simulator through the Erlang-B mathematical model, comparing the simulation results with the model. The choice of networks is due to the representativeness of the Ipê network in the Brazilian national scenario and the metropolitan characteristic of the Pan-European network. The research contributes to the development of telecommunications and elastic optical networks by analyzing the efficiency of different network topologies. This helps in choosing the most appropriate models to handle heavy traffic and manage the frequency spectrum efficiently. The choice of the Pan-European network and the Ipê network is justified by the difference in structure and geographic dispersion, allowing the analysis of the impact of these characteristics on the efficiency of data transmission. The study aims to determine which topology, between the Pan-European and the Ipê, is more efficient for implementing elastic optical

fibers, considering heavy traffic scenarios and the need for efficient management of the frequency spectrum. The initial hypothesis was confirmed, the Pan-European network presented a lower blocking rate. The Ipê network, even with an increase in slots, still proved to be less efficient.

KEYWORDS: Elastic Optical Network; Single Link; Simulation; Specter Attribution.

INTRODUÇÃO

O tráfego virtual em constante expansão exige tecnologias de transmissão de dados mais eficientes, capazes de suprir a crescente demanda por largura de banda. As redes ópticas elásticas, com sua promessa de superar as redes ópticas tradicionais, despontam como uma solução promissora. Essa tecnologia divide o espectro óptico em *slots* de frequência flexíveis, combináveis para criar canais de largura de banda adaptáveis à demanda. Essa capacidade de adaptação resulta em uma utilização mais eficiente do espectro óptico quando comparada às redes de grade fixa (Chatterjee e Oki, 2020).

Apesar do potencial, a implementação eficiente de redes ópticas elásticas requer uma análise dos desafios relacionados à alocação de rotas e espectros, considerando as particularidades de cada topologia de rede (Lopes e Velasco, 2016).

Este estudo compara a eficiência de duas topologias de rede distintas: a rede Pan-Europeia, que abrange grande parte da União Europeia, com 28 nós e 41 enlaces bidirecionais, com distância máxima entre dois nós de 5051 km, e a Rede Ipê, uma rede acadêmica brasileira, administrada pela RNP, que se estende por todo o território nacional com pontos de presença em todas as 27 unidades federativas, conectando mais de 1.100 campi e unidades de instituições de ensino e pesquisa.

A hipótese inicial é que a rede Pan-Europeia, devido à sua estrutura mais compacta e menor dispersão geográfica, apresenta maior eficiência em relação à Rede Ipê. A análise busca determinar qual topologia se mostra mais adequada para a implementação de fibras ópticas elásticas, considerando cenários de tráfego intenso e a necessidade de uma gestão eficaz do espectro de frequências.

MATERIAL E MÉTODOS

A validação do simulador foi baseada nos resultados do matemático Agner Krarup Erlang, um matemático, estatístico e engenheiro dinamarquês, conhecido por suas contribuições fundamentais na teoria das filas e na engenharia de tráfego de telecomunicações (Erlang, 1909). Para tanto, os resultados do simulador para um enlace avulso foram inicialmente comparados com os resultados obtidos para o modelo de Erlang-B.

A pesquisa foi realizada através de uma simulação em Python, utilizando os módulos e bibliotecas: *random*, para gerar números aleatórios que simulam o comportamento estocástico das requisições; *SimPy*, para construir a simulação de eventos discretos, modelando o sistema de filas; *NumPy*, para lidar com cálculos numéricos eficientes, especialmente em arrays multidimensionais; e *Matplotlib*, para criar visualizações gráficas dos resultados. Toda a programação foi feita no Jupyter Notebook, um ambiente interativo popular para desenvolvimento em Python.

O simulador, após programado, foi validado de acordo com o modelo matemático de Erlang-B e possui um sistema de tamanho de requerimento baseado em distância, que permite levar em consideração a modulação mais adequada para um dado comprimento do caminho óptico, conforme descrito no artigo Mello (2015).

As informações das topologias foram retiradas dos artigos de Wosinska (2009) para a rede Pan-Europeia e de Bispo, Varjão e Brito (2018) para a rede Ipê. Essas duas redes foram escolhidas porque a Ipê é uma das redes nacionais brasileiras mais conhecidas, enquanto a Pan-Europeia, apesar de cobrir uma grande área do continente europeu, é caracterizada como uma rede metropolitana.

Para a obtenção dos resultados, foram realizadas 100 simulações de 1.000.000 requisições em cada rede, com todos os enlaces de cada rede possuindo 28 *slots* de frequência disponíveis,

correspondendo ao máximo de ocupação que um requerimento pode apresentar. Após a coleta dos resultados, foi calculada uma média simples das taxas de bloqueio foi calculada para cada rede, a fim de fornecer uma visão geral do desempenho. Com as taxas de bloqueio médias em mãos, foi então criada uma relação entre o desempenho da rede Pan-Europeia e da rede Ipê.

O próximo passo da metodologia envolveu a multiplicação da quantidade de *slots* disponíveis na rede com pior desempenho por essa relação de eficiência. O valor resultante, representando uma otimização da alocação de recursos, foi arredondado para cima caso fosse decimal.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi encontrado que, nas circunstâncias de simulação descritas, a rede Pan-Europeia apresenta uma taxa média de bloqueio de 66,8184%, enquanto a rede Ipê tem uma taxa média de bloqueio de 75,6116%. Isso significa que a rede Pan-Europeia é 1,360548 vezes mais eficiente na transmissão de requisições do que a rede Ipê.

Ao aumentar a quantidade de *slots* disponíveis na rede Ipê ($1,360548 * 28 = 38,095344$, arredondado para 39), a taxa média de bloqueio da rede Ipê cai para 69,9767%. Mesmo assim, a rede Pan-Europeia continua sendo 1,105196 vezes mais eficiente na transmissão de requisições do que a rede Ipê.

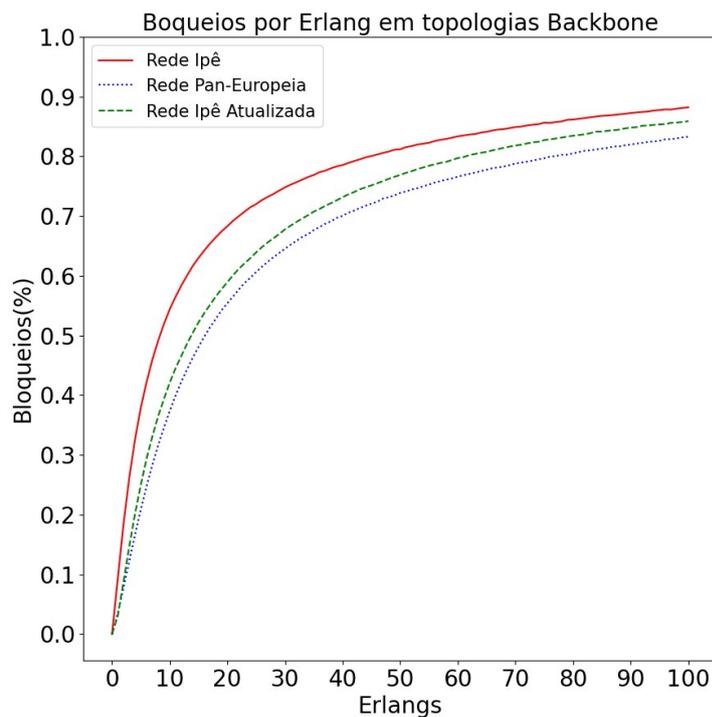


FIGURA 2. Gráfico comparativo das porcentagens de bloqueio entre a rede Ipê, a rede Pan-Europeia e a rede Ipê atualizada com a quantidade de *slots* disponíveis ampliada para valores de Erlang de 0 a 100.

CONCLUSÕES

A análise comparativa da eficiência de transmissão em redes ópticas elásticas, utilizando como estudo de caso as topologias da rede Pan-Europeia e da rede Ipê, corrobora a hipótese inicial de que a primeira rede, por ser mais compacta e menos dispersa geograficamente, apresenta um desempenho superior. A partir da simulação, constatou-se que a rede Pan-Europeia demonstra uma menor taxa de bloqueio para todos os valores de Erlang testados.

Essa diferença de desempenho evidencia a influência da dispersão geográfica na eficiência da transmissão de dados. A rede Ipê, mesmo após a otimização da quantidade de slots disponíveis, com um aumento baseado na relação de eficiência entre as duas redes, apresentou uma taxa de bloqueio 1,047267 vezes maior do que a Pan-Europeia. Tal resultado sugere que a distância entre os nós, impactando diretamente o tamanho das requisições em termos de slots, é um fator crucial a ser considerado.

Em suma, a rede Pan-Europeia se revela mais adequada para a implementação de fibras ópticas elásticas, especialmente em cenários de tráfego intenso que exigem uma gestão eficiente do espectro de frequências. A capacidade de lidar com um maior volume de requisições simultâneas, utilizando o espectro de forma otimizada, a torna mais apta a atender às demandas atuais de transmissão de dados. É importante ressaltar que este estudo se baseou em simulações, cujos resultados podem variar de acordo com as condições específicas do modelo. Pesquisas futuras, explorando diferentes topologias de rede, algoritmos de roteamento dinâmico e o impacto de tecnologias como WDM/OCDM, são essenciais para aprofundar a compreensão da eficiência das redes ópticas elásticas.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram com a conceitualização, curadoria de dados, análise de dados, recebimento de financiamento, pesquisa, metodologia, administração do projeto, disponibilização de ferramentas, desenvolvimento, implementação e teste de software, supervisão, validação de dados e experimentos, design da apresentação de dados, revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa CNPq e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo pela concessão da bolsa de Iniciação Científica (PIBIC) que originou este trabalho.

REFERÊNCIAS

- BISPO, Lorraine PP; VARJAO, Jonatha OR; BRITO, George LR. Uma Análise dos Algoritmos de Busacker e Gowen e de Ford e Fulkerson para Problemas de Fluxo de Custo Mínimo, 2018.
- CHATTERJEE, Bijoy; OKI, Eiji. **Elastic Optical Networks: Fundamentals, Design, Control, and Management**. CRC Press, 2020.
- ERLANG, Agner Krarup. The theory of probabilities and telephone conversations. *Nyt. Tidsskr. Mat. Ser. B*, v. 20, p. 33-39, 1909.
- LÓPEZ, Víctor; VELASCO, Luis (Ed.). **Elastic Optical Networks: Architectures, Technologies, and Control**. Springer, 2016.
- MELLO, Darli AA et al. Parameter selection in optical networks with variable-code-rate transceivers. In: 2015 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM). IEEE, 2015. p. 51-56.
- NETWORKING INDEX, Cisco Visual. Forecast and methodology, 2016-2021, white paper. **San Jose, CA, USA**, 2016.
- OKI, Eiji; CHATTERJEE, Bijoy Chand. Design and control in elastic optical networks: Issues, challenges, and research directions. In: **2017 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)**. IEEE, 2017. p. 546-549.
- PÁDUA, Elisabete Matallo M. **Metodologia da pesquisa: abordagem teórico-prática**. Papirus Editora, 2019.
- RECOMMENDATION, G. 694.1: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. **International Telecommunications Union**, Tech. Rep, 2012.

SHEN, Gangxiang; GUO, Hong; BOSE, Sanjay K. **Survivable elastic optical networks: survey and perspective**. Photonic Network Communications, v. 31, n. 1, p. 71-87, 2016.

SINGAL, Tarsem Lal. **Optical fiber communications: principles and applications**. Cambridge University Press, 2016.

WALDMAN, Helio. The impending optical network capacity crunch. In: 2018 **SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC)**. IEEE, 2018. p. 1-4.

WALDMAN, H. et al. Spectrum-sliced elastic optical networking. In: **Transparent Optical Networks (ICTON), 2013 15th International Conference on**. IEEE, 2013. p. 1-4.

WALDMAN, Helio et al. Fast spectrum exhaustion under incremental traffic in the elastic single link. In: **Telecommunications Symposium (ITS), 2014 International**. IEEE, 2014. p. 1-4.

WOSINSKA, Lena et al. Lightpath routing considering differentiated physical layer constraints in transparent WDM networks. In: 2009 Asia Communications and Photonics conference and Exhibition (ACP). IEEE, 2009. p. 1-8.

ZHANG, Guoying et al. A survey on OFDM-based elastic core optical networking. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 15, n. 1, p. 65-87, 2013.